

# Evaluation der anatomischen Verhältnisse nach Implantation von proximalen Humerusmarknagelsystemen

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades

doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät  
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

von Daniel Gröschel  
geboren am 07.05.1982 in Altenburg

**Gutachter:**

1. Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Gunther Hofmann, Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Friedrich-Schiller-Universität Jena
2. Prof. Dr. med. Thomas Mückley, Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Helios Klinikum Erfurt
3. Prof. Dr. med. Volker Bühren, Berufsgenossenschaftliche Unfallklinik Murnau

**Tag der öffentlichen Verteidigung:**

02.09.2014

## Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
ACHP	Arteria circumflexa humeri posterior
Acr	Acromion
APB	Arteria profunda brachii
CT	Computertomographie
L	Lateral
LBS	lange Bizepssehne
Lig.	Ligamentum
M.	Musculus
MD	Musculus deltoideus
MI	Musculus infraspinatus
MTB	Musculus triceps brachii
MTMA	Musculus teres major
MTMI	Musculus teres minor
MW	Mittelwert
N.	Nervus
NA	Nervus axillaris
NR	Nervus radialis
R.	Ramus
SD	Standardabweichung
SSEP	Somatosensibel evozierte Potentiale
T.	Tuberculum
T2 <sup>TM</sup>	T2 <sup>TM</sup> Proximales Humerusnagel System
Z	Zentral

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung und theoretische Grundlagen</b>	<b>8</b>
1.1 Problematik proximaler Humerusfrakturen	8
1.2 Unfallmechanismus und -ursache	9
1.3 Anatomie des Schultergelenkes	9
1.4 Frakturklassifikationen	13
1.5 Therapie proximaler Humerusfrakturen	15
<b>2. Ziele</b>	<b>17</b>
<b>3. Material und Methoden</b>	<b>19</b>
3.1 Studienaufbau	19
3.2 Targon® PH	19
3.3 T2™ Proximales Humerusnagel System	21
3.4 Implantatvergleich	23
3.5 Operationstechniken	24
3.6 Radiologische Untersuchungen	26
3.7 Anatomische Präparation	26
3.8 Statistik	30
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>31</b>
4.1 Targon® PH vs. T2™	31
4.2 T2™ zentral vs. T2™ lateral	38
4.3 Radiologische Auswertung	42
<b>5. Diskussion</b>	<b>44</b>
<b>6. Schlussfolgerung</b>	<b>54</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>

<b>Lebenslauf</b> .....	<b>65</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>66</b>
<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b> .....	<b>67</b>

## Zusammenfassung

Die proximale Humerusfraktur ist eine häufige Fraktur, insbesondere des älteren Menschen. Neben den durch das Lebensalter bedingten Komorbiditäten nimmt auch die Frakturkomplexizität mit dem Lebensalter zu. Obwohl ein Großteil der Frakturen konservativ behandelt werden kann, wird jedoch zunehmend die operative Therapie bevorzugt. Hiermit kann eine längerfristige Ruhigstellung vermieden werden und die Patienten können zügiger in ihren Lebensalltag zurückkehren. In den letzten Jahren wurde versucht, die vielfältigen operativen Behandlungsmöglichkeiten bzw. Implantatsysteme zu gliedern und entsprechend der Frakturmorphologie und den Patientenansprüchen anzuwenden.

In dieser Studie wurden zwei unterschiedliche intramedulläre Marknagelsysteme hinsichtlich ihrer Beziehungen zu den anatomischen Strukturen im Bereich des proximalen Humerus nach Implantation betrachtet und verglichen. Hierfür wurden der Targon® PH (Fa. Aesculap) und der T2™ (Fa. Stryker) verwendet. Beide Nagelsysteme verfügen über 4 winkelstabile Verriegelungsschrauben im proximalen Anteil und 2 Verriegelungsschrauben im distalen Nagelbereich. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich Design, Angulation und Lage der Verriegelungsschrauben voneinander. Für den T2™ besteht zudem die Möglichkeit einer zentralen oder lateralen Implantationstechnik im Bereich des Nageleintrittspunktes. Die Implantation erfolgte an 20 Schultern von Frischleichen entsprechend den Herstellervorgaben durch einen erfahrenen Operateur (Prof. Dr. med. T. Mückley). Hierbei wurden bei insgesamt 5 Schulterpaaren der Targon® PH bzw. der T2™ verwendet. Bei weiteren 5 Schulterpaaren wurde nur der T2™ benutzt und ein zentraler bzw. lateraler Eintrittspunkt gewählt. Nach erfolgter Implantation wurden die Schultern präpariert und die Beziehungen anatomischer Strukturen zu Nagel bzw. Verriegelungsschrauben dargestellt. Hierbei waren die Tubercula, Nervus axillaris, Arteria circumflexa humeri posterior, lange Bizepssehne sowie Nervus radialis und Arteria profunda brachii im proximalen Humerusdrittel von Interesse. Zudem wurde analysiert, ob sich durch einen veränderten Eintrittskorridor (zentral oder lateral) auch die Schraubenposition im proximalen Humerus ändert, um somit eine bessere Fixation der relevanten knöchernen Strukturen zu gewährleisten. Des Weiteren wurde mittels Computertomographie die intraossäre Lage der Implantate dargestellt.

Im Rahmen der anatomischen Betrachtung konnte der T2™ bessere Ergebnisse bei der Lage der proximalen Verriegelungsschrauben zur langen Bizepssehne erzielen. Der Targon® PH hingegen wies eine höhere Verletzungsmöglichkeit dieser auf. In Bezug auf den anterioren Ast des Nervus axillaris bestand jedoch für den T2™ die Gefahr einer potentiellen Schädigung durch eine signifikant engere Lagebeziehung zu den proximalen Verriegelungsschrauben. Beide Implantate können durch die distalen Verriegelungsschrauben Strukturen im Bereich der Achsellücken verletzen, da hier ebenfalls eine enge anatomische Lagebeziehung zu finden war. Dabei erwies sich für den Targon® PH die Arteria circumflexa humeri posterior und der Nervus axillaris durch die proximale der distalen Verriegelungsschrauben als potentiell gefährdet. Für den T2™ waren es Nervus radialis und Arteria profunda brachii durch die distalste Verriegelungsschraube. Eine sichere Zone fand sich konstant im Ansatzbereich des Musculus teres major. Radiologisch konnten die beiden Anteile des Tuberculum majus sowie die Kalotte regelhaft durch die Schraubenimplantate gefasst werden. Der Targon® PH wies signifikant eine unzureichende Fixation des Tuberculum minus auf. Auch der T2™ zeigte bei einer lateralen Implantationstechnik eine signifikant unzureichende Fixation dieses potentiellen Fragmentes im Vergleich zu einem zentral gewählten Eintrittspunkt. Laut Operationsanleitung obliegt es dem Operateur, welche Verriegelungsschraube zuerst eingebracht wird. Wir empfehlen im Ergebnis jedoch zuerst das Tuberculum minus Fragment sicher zu fixieren, da sich sonst eine mögliche Schädigung der langen Bizepssehne ergibt. Der Zugang sollte hierfür groß genug sein, um neben einer palpatorischen auch eine visuelle Kontrolle zu ermöglichen. Zudem sollte das Zielinstrumentarium temporär transfixiert werden, um Derotationen zu vermeiden. Eine laterale Implantationstechnik kann für den T2™ nicht empfohlen werden, da das Tuberculum minus unzureichend fixiert wird und ein höheres Verletzungsrisiko für die lange Bizepssehne besteht. Für die distalen Verriegelungsschrauben ergeben sich potentielle Verletzungen in der lateralen und distalen Achsellücke, wobei sich eine sichere Zone im Ansatzbereich des Musculus teres major findet. Nicht nur die Schraubenspitzen durch überstehende Implantate, sondern auch die Bohrung des Schraubenloches bergen das Risiko, wichtige Strukturen in diesem Bereich zu verletzen. Um diese sichere Zone zu erreichen, sollte nur eine distale Verriegelungsschraube eingebracht werden, d.h. die distalste bei Verwendung des Targon® PH bzw. die proximale der distalen Verriegelungsschrauben beim Einsatz des T2™.

# **1. Einleitung und theoretische Grundlagen**

## **1.1 Problematik proximaler Humerusfrakturen**

Proximale Humerusfrakturen sind mit einem Anteil von 4-5 % aller Extremitätenfrakturen eine häufige Fraktur, insbesondere bei älteren Menschen mit schlechter Knochenqualität (Szyszkowitz und Schippinger 1999, Habermeyer und Schweiberer 1989). Es steigt mit zunehmendem Lebensalter die Inzidenz an Frakturen in diesem Bereich. Frauen sind hierbei doppelt so häufig betroffen wie Männer (Rose et al. 1982). Bereits bei nur geringer Krafteinwirkung kann es zu einer Trümmerfraktur kommen. Aufgrund der mit zunehmendem Lebensalter steigenden Häufigkeit einer Osteoporose nimmt neben der Frakturhäufigkeit auch die Frakturkomplexizität zu. Dies stellt wiederum eine große Herausforderung an die Behandlungsstrategie dar (Lill und Josten 2000). Statistisch können 60-80 % der Frakturen konservativ behandelt werden. Hierzu zählen die nicht oder minimal dislozierten Frakturen (Towfigh et al. 1993, Koval et al. 1997). Die konservative Therapie erfolgt in Adduktionsstellung des Schultergelenkes in mittlerer Innenrotation, welche bereits von Böhler als Ruhestellung des Schultergelenkes beschrieben wurde (Böhler 1963). Dies wird mit der Anlage eines Gilchristverbandes erreicht. Der in Abduktionsstellung wirkende Zug des Musculus pectoralis major und damit eine möglichen Schaftdislokation nach medial wird somit vermieden (Böhler 1963). Nach Röntgenkontrolle und Nachlassen des Frakturschmerzes kann nach 7-10 Tagen mit der frühfunktionellen Beübung begonnen werden (Habermeyer und Schweiberer 1991). Röntgenkontrollen sollten zu Beginn wöchentlich, im weiteren Verlauf alle zwei Wochen erfolgen (Habermeyer 1997). Das Therapiespektrum der dislozierten Frakturen reicht von der konservativen Therapie (Rasmussen et al. 1992, Zyto et al. 1997) bis zur primären endoprothetischen Versorgung (Bosch et al. 1998). In den letzten Jahren wurde versucht, diese unterschiedlichen operativen Behandlungsmöglichkeiten im Sinne eines fragment- bzw. frakturabhängigen Konzeptes zu gliedern und anzuwenden. Neben der Wahl des richtigen Operationsverfahrens bzw. des Implantates erweist sich das Verhindern einer Humeruskopfnekrose (Laing 1956) sowie die Wiederherstellung einer schmerzfreien Funktion des Armes als große Herausforderung (Zyto et al. 1995). Nicht nur Patienten, die im Berufsleben stehen, sondern insbesondere auch ältere Menschen



sind auf ein funktionsfähiges Schultergelenk und dessen Beanspruchung bei Halte- und Greiffunktionen angewiesen. Daher ist eine weitestgehend intakte Schulter-Arm-Funktion eine wichtige Voraussetzung zum Erhalt der Selbständigkeit im täglichen Leben (Cofield 1988).

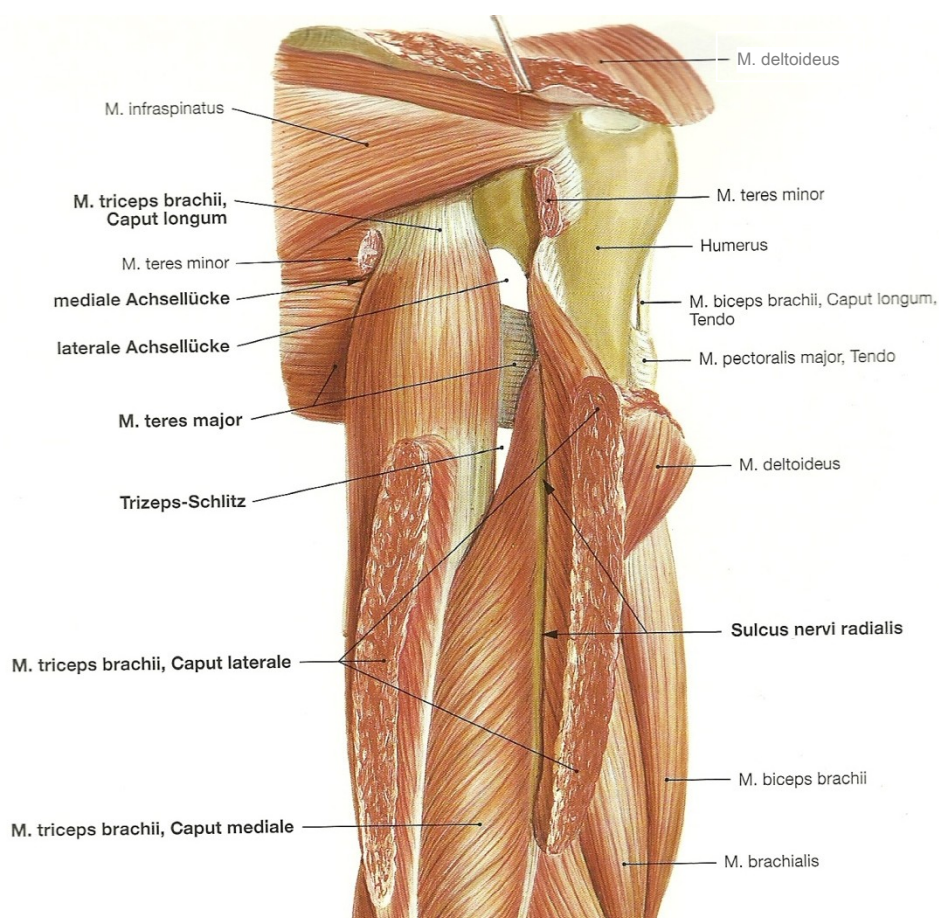
## **1.2 Unfallmechanismus und -ursache**

Der Unfallmechanismus ist weitestgehend einheitlich. Meist kommt es durch einen Sturz mit direktem Anpralltrauma der Schulter sowie Stürze auf den ausgestreckten bzw. abduzierten Arm mit Rotationskomponente zur Fraktur. Hierbei ereignen sich 50% der Unfälle im häuslichen Milieu, gefolgt von Verkehrs-, Sport- und Arbeitsunfällen (Towfigh et al. 1993). Daneben treten im Bereich des proximalen Humerus auch zunehmend pathologische Frakturen auf. Ursächlich hierfür sind neben der Osteoporose auch Knochenmetastasen im Rahmen von Tumorerkrankungen (Siegel et al. 2010). Hinsichtlich der einwirkenden Kräfte können Kompressions-, Scher- und Biegebungsbrüche unterschieden werden (Habermeyer und Schweiberer 1991).

## **1.3 Anatomie des Schultergelenkes**

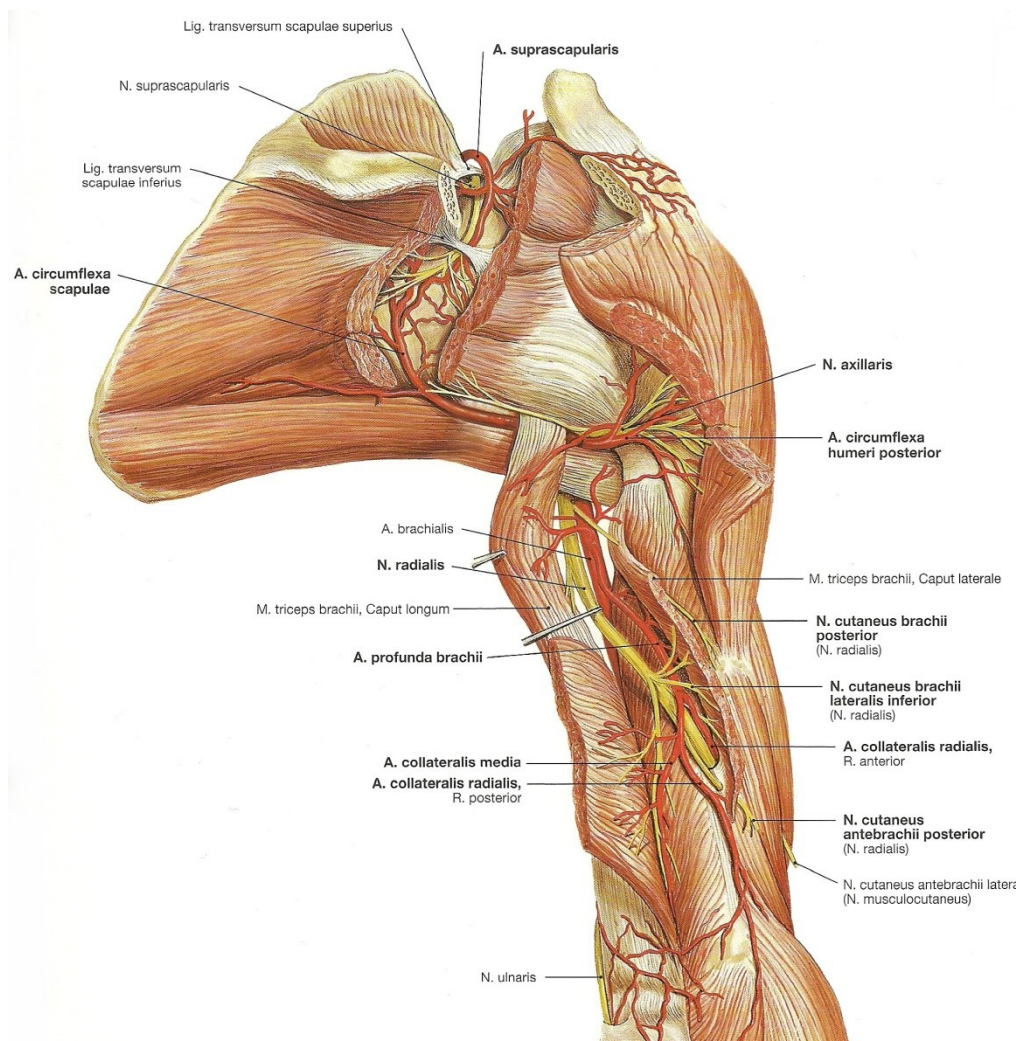
Das Schultergelenk wird durch die Cavitas glenoidalis der Scapula und das Caput humeri gebildet. Zusammen mit der Articulatio sternoclavicularis und der Articulatio acromioclavicularis bilden sie als funktionelle Einheit den Schultergürtel. Die Position der Gelenkpfanne kann durch die Rotations- und Translokationsbewegungen der Scapula in kranialer Richtung verändert werden (thorakoscapuläres Gelenk). Dadurch wird ein größeres Abduktionsausmaß erreicht. Durch das Zusammenspiel des glenohumeralen Gelenkes und der Scapularotation wird das Schultergelenk zum beweglichsten Gelenk des menschlichen Körpers. Des Weiteren ist das Schultergelenk durch ein Größenmißverhältnis des Humeruskopfes und der Gelenkpfanne gekennzeichnet. Der Rand der Schultergelenkpfanne wird durch das Labrum glenoidale erhöht. Die weite Gelenkkapsel entspringt an der Scapula um das Labrum und setzt am Collum anatomicum des Humerus an. Die glenohumeralen Bänder (Lig. glenohumerale superius, Lig. glenohumerale medium, Lig.

glenohumerale inferius) verstärken die Kapsel nach ventral. Musculus infraspinatus, Musculus teres minor, Musculus subscapularis und Musculus supraspinatus bilden zusammen die Rotatorenmanschette und wirken entsprechend ihrer Konfiguration von Ursprung und Ansatz auf die Schulterbewegungen in allen 3 Bewegungsebenen. Sie zentrieren den Humeruskopf im Glenoid und stabilisieren zusammen mit der Kapsel und den glenohumeralen Bändern das Schultergelenk. Durch den Verlauf des Musculus teres minor mit Ansatz am Tuberculum majus sowie des Musculus teres major mit seinem Ansatz an der Crista tuberculi minoris und dem langen Kopf des Musculus triceps brachii entstehen die sogenannten Achsellücken (**Abb. 1, 2**). Durch die dreieckig geformte mediale Achsellücke verläuft die Arteria circumflexa scapulae. Die laterale viereckige Achsellücke wird von Nervus axillaris und Arteria circumflexa humeri posterior durchlaufen. Nach lateral begrenzt das Collum chirurgicum diese geometrische Anordnung (Lippert 2000). Der Nervus axillaris verläuft als oberste Struktur in der lateralen Achsellücke. Gemeinsam mit der Arteria circumflexa humeri posterior verläuft er oberhalb des Ursprungs des Caput laterale des Musculus triceps brachii (Tubbs et al. 2005).



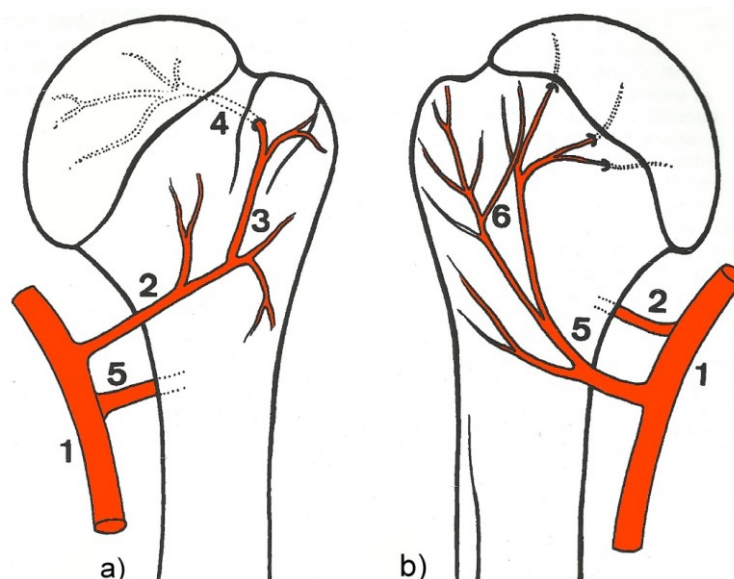
**Abb. 1:** Muskeln der Schulter und des proximalen Humerus rechts sowie die Achsellücken in dorsaler Ansicht (aus Paulsen und Waschke 2010)

Der Nervus axillaris teilt sich hierbei in zwei Hauptäste auf. Der posteriore Anteil versorgt den Musculus teres minor sowie den dorsalen Teil des Musculus deltoideus und endet als Nervus cutaneus brachii lateralis superior. Der anteriore Ast umwindet den Humerus nach ventral und versorgt den mittleren und ventralen Anteil des Musculus deltoideus. Hierbei verläuft er subfaszial bzw. intramuskulär (Perlmutter 1999, Burkhead et al. 1992). Unterhalb des Musculus teres major findet man zwischen dem Caput laterale und dem Caput longum des Musculus triceps brachii die distale Achsellücke oder den Trizepsschlitz (Paulsen und Waschke 2010, Thiel 2005). Diese hat eine dreieckförmige Konfiguration (Tubbs et al. 2008). Hier verlaufen Nervus radialis und Arteria profunda brachii. Der Nervus radialis gibt dort motorische Fasern zu lateralem und medialem Kopf des Musculus triceps brachii ab (DeFranco und Lawton 2006). Nach Überkreuzen des Caput mediale des Musculus triceps und Abgabe sensibler Äste verläuft er im Septum intermusculare brachii laterale weiter zum Unterarm.



**Abb. 2:** Arterien und Nerven der Schulter und des proximalen Humerus rechts in dorsaler Ansicht (aus Paulsen und Waschke 2010)



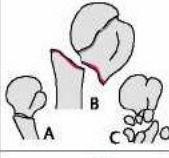











Die Hauptversorgung des Humeruskopfes erfolgt durch die Arteria circumflexa humeri anterior, welche aus der Arteria axillaris entspringt (**Abb. 3**). Von ihr zweigt die Arteria ascendens ab, welche einige Äste zum Tuberculum minus abgibt und anschließend die lange Bizepssehne unterkreuzt. Lateral des Bizepssehnensulcus steigt sie als anterolateraler Zweig nach kranial, um am oberen Ende der intertuberkulären Zone in den Humeruskopf einzutreten (Gerber et al. 1990). Intraossär verläuft sie als Arteria arcuata und versorgt ca. zwei Drittel der Epiphyse. Sie bildet dort Anastomosen mit der Arteria circumflexa humeri posterior. Aus dieser konnte ein Gefäßgeflecht nachgewiesen werden, welches im Bereich der Knorpel-Knochen-Grenze mediallyseitig eindringt (Meyer et al. 2005). Dieses ist wesentlich an der Blutversorgung beteiligt. Eine frakturbedingte Verletzung mit Läsionen der medialen Periostbrücke („medial hinge“) und der medialen Gefäße ist hauptverantwortlich für die Humeruskopfnekrose (Hertel et al. 2004). Des Weiteren werden extraossäre Anastomosen durch Arteria circumflexa humeri anterior, Arteria circumflexa humeri posterior, Arteria subscapularis, Arteria suprascapularis und Arteria thoracoacromialis gebildet. Die Arteriae circumflexa humeri anterior et posterior sind jedoch die einzigen Arterien, welche direkt in den Humeruskopf eintreten und für die Blutversorgung des Humeruskopfes elementar sind (Laing 1956). Neuere Studien haben gezeigt, dass 64 % der Blutversorgung des proximalen Humerus durch die Arteria circumflexa humeri posterior und nur 36 % durch die Arteria circumflexa humeri anterior gewährleistet werden (Hettich et al. 2010).



**Abb. 3:** a) ventrale Ansicht des proximalen Humerus. 1 – A. axillaris, 2 – A. circumflexa humeri anterior, 3 – anterolateraler Ast, 4 – A. arcuata, 5 – A. circumflexa humeri posterior. b) dorsale Ansicht. 6 – posteromediale Äste (modifiziert aus Szyszkowitz 1993)

## 1.4 Frakturklassifikationen

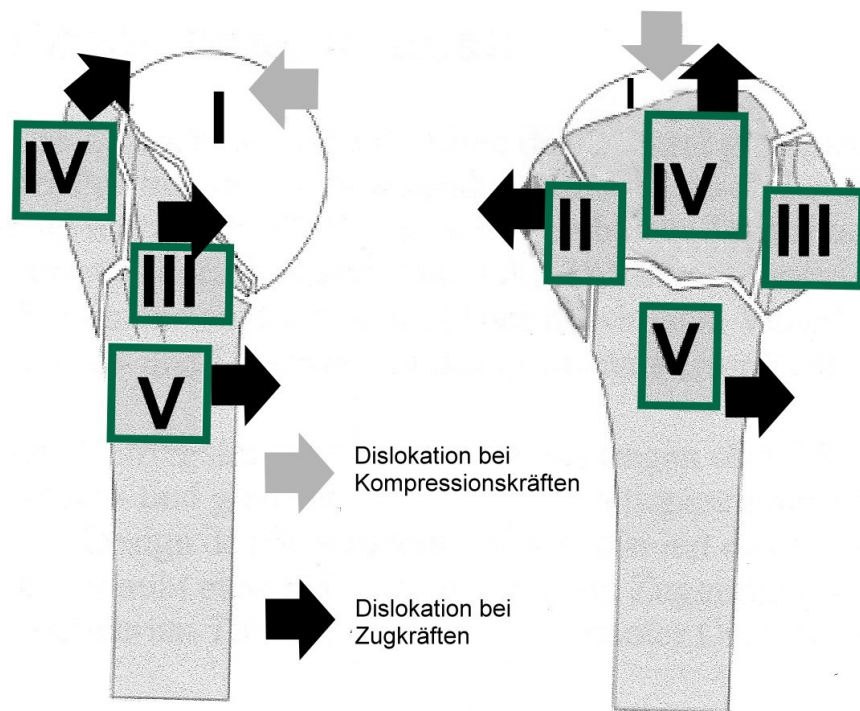
Die häufig verwendete Fraktureinteilung des proximalen Humerus nach Neer (Neer 1970) geht auf die Fragmenteinteilung von Codman zurück (Codman 1934), welcher prinzipiell 4 Hauptfragmente – Tuberculum majus, Tuberculum minus, Kopfkalotte und Humerusmetaphyse – unterschied. Neer berücksichtigte neben der Fragmentanzahl zudem den Grad der Dislokation. Hierbei gilt eine Verschiebung eines der Hauptfragmente von mehr als 1 cm respektive eine Abkipprung von mehr als 45° als Dislokation. Die Einteilung ergibt sich also aus Frakturverlauf, Fragmentanzahl und Dislokationsgrad. Insgesamt gibt es 6 Frakturgruppen mit 1-4 Fragmenten und ggf. in Kombination mit einer Gelenkluxation. Die einzelnen Gruppen weisen je nach Fragmentanzahl Untergruppen auf, wobei hier bei steigender Fragmentanzahl die Prognose beeinträchtigt wird (Neer 1970) (**Abb. 4**).

I minimale Dislokation 	Dislozierte Fraktur		
	2 Fragmente	3 Fragmente	4 Fragmente
II Collum anatomicum 			
III Collum chirurgicum 			
IV Tuberculum majus 			
V Tuberculum minus 			
VI Luxations- frakturen anterior 			
posterior 			

**Abb. 4:** Neer-Klassifikation (aus Babst 2006)

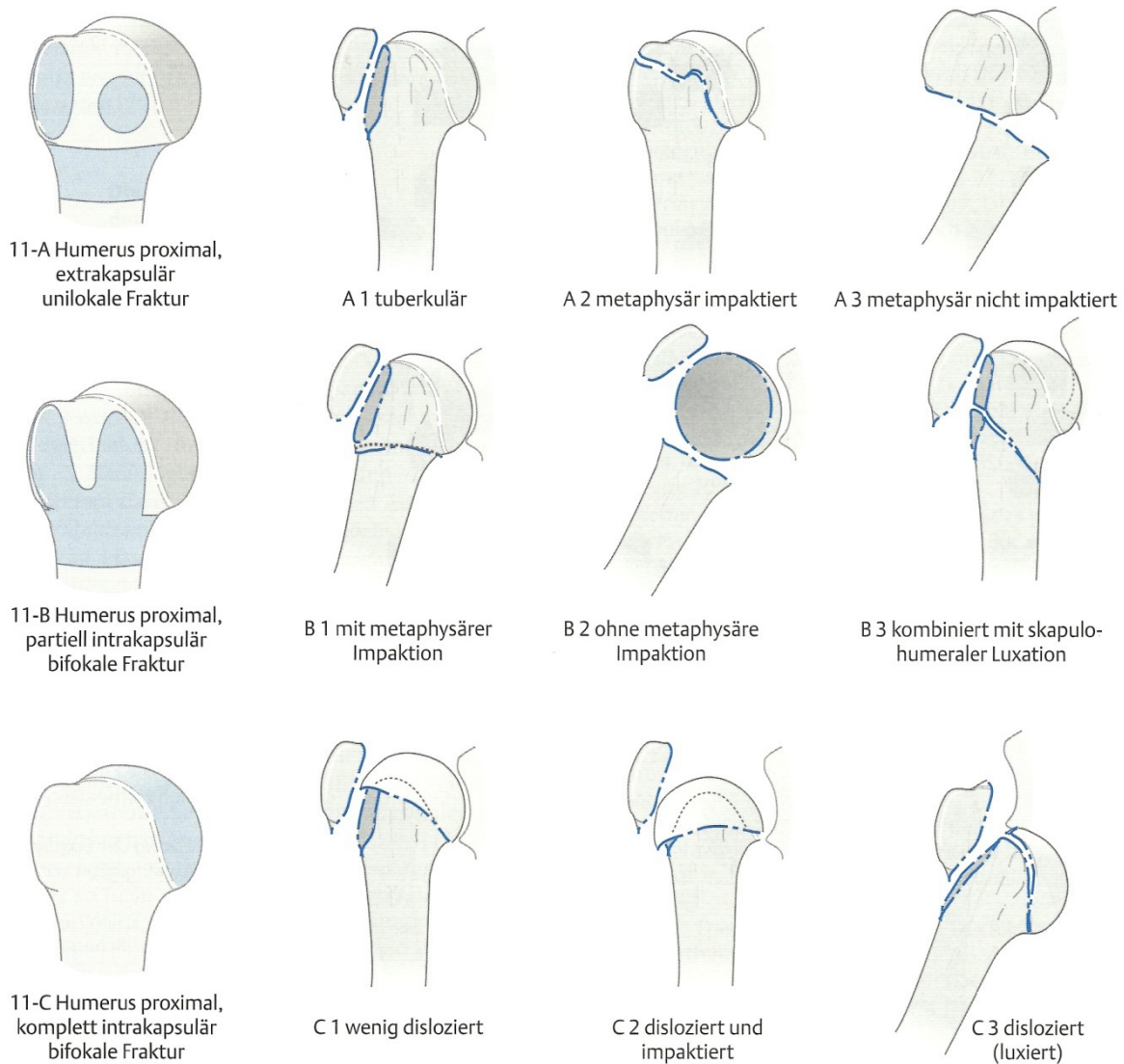


Mittlmeier et al. stellten ein Konzept mit 5 Hauptfragmente vor (Mittlmeier et al. 2003). Das Tuberculum majus ist häufig in zwei unabhängige Elemente gespalten. Diese beiden auch funktionell unterschiedlichen Anteile sind das kranio laterale Fragment mit Ansatz der Supraspinatussehne und das dorsolaterale Fragment mit Ansatz der Sehne des Musculus infraspinatus (**Abb. 5**).



**Abb. 5:** Konzept der 5 Hauptfragmente. I - Kalotte, II - dorsolaterales Fragment T. majus, III – T. minus, IV - kranio laterales Fragment T. majus, V – proximales Schaftfragment (modifiziert aus Mittlmeier und Stedtfeld 2004)

Eine weitere Einteilung ist anhand der AO-Klassifikation entsprechend dem ABC-System möglich (Müller et al. 1992) (**Abb. 6**). Hier wird als Ergänzung zur Neer-Klassifikation zusätzlich die Höhe des Frakturverlaufs berücksichtigt. Gruppe A beinhaltet die unifokalen extrakapsulären Frakturen, Gruppe B die bifokalen partiell intrakapsulären Frakturen und die Gruppe C die intrakapsulären Frakturen. Insgesamt ergeben sich durch weitere Untergruppen insgesamt 27 verschiedene Frakturtypen. Aufgrund der Vielzahl der Einteilungsmöglichkeiten zeigt sich die Einteilung im klinischen Alltag als problematisch (Siebenrock und Gerber 1992).



**Abb. 6:** AO-Klassifikation nach Müller (aus Lill 2006)

## 1.5 Therapie proximaler Humerusfrakturen

Für die Therapie der proximalen Humerusfraktur kommen abhängig von der Frakturmorphologie, Dislokation und dem Patientenalter konservative und operative Verfahren zum Einsatz. Im Rahmen der konservativen Therapie erfolgen die kurzfristige Ruhigstellung des Schultergelenkes und die frühfunktionelle Beübung bei Nachlassen des Frakturschmerzes (Krettek und Wiebking 2011, Franke und Ambacher 2012). Für die operative Versorgung von dislozierten Humeruskopffrakturen stehen neben der Oberarmkopfprothese, eine Vielzahl von Osteosynthesen zur Verfügung. Neben den konventionellen Plattenosteosynthesen werden zudem Marknagelsysteme in unterschiedlichem Design verwendet. Beide

Operationsverfahren werden aufgrund der zunehmenden Kenntnis über die Implantattypen sowie die postoperativen Ergebnisse differenziert eingesetzt (Katthagen et al. 2012). So werden die Plattenosteosynthesen vorwiegend für 4-Segmentfrakturen und bei jüngeren Patienten aufgrund der Integrität der Rotatorenmanschette angewendet. Die Indikationen für Nagelosteosynthesen werden in der Literatur für subkapitale 2 Segment Frakturen (Neer III, AO 11 A2/A3) sowie 3 Segment Frakturen mit Beteiligung der Tubercula (Neer IV-3 und V-3, AO 11 B1-3) angegeben (Mittlmeier et al. 2003, Blum et al. 2009, Gradl et al. 2009, Murray et al. 2011). Ein überlegenes Verfahren konnte bisher trotz dieser Empfehlungen für keinen Frakturtyp nachgewiesen werden (Lanting et al. 2008). Darüber hinaus ist die osteosynthetische Versorgung von proximalen Humerusfrakturen mit einem hohen Maß an Komplikationen verbunden (Braunstein 2013). Hierbei sind die Entstehung von Humeruskopfnekrosen, Materialdislokationen, Schraubenperforationen, Repositionsverlusten, Bewegungseinschränkungen oder Infektionen zu nennen, welche eine operative Revision notwendig machen können. Neben diesen genannten Komplikationen können im Rahmen der operativen Versorgung außerdem anatomische Strukturen im Bereich des proximalen Humerus verletzt werden, welche mit dem Zugangsweg oder dem verwendeten Implantat assoziiert sind (Prince et al. 2004, Nijs et al. 2008, Stecco et al. 2010). Die Therapie von proximalen Humerusfrakturen erweist sich aufgrund der genannten Faktoren sowohl bei der Wahl des Therapieregimes als auch dem Operationsverfahren und dessen Durchführung als sehr anspruchsvoll.



## 2. Ziele

Marknagelosteosynthesen werden bei der operativen Therapie von proximalen Humerusfrakturen im klinischen Alltag häufig eingesetzt. Das Prinzip basiert auf der antegraden Implantation kurzer Nägel mit speziellen proximalen Verriegelungsschrauben für den Humeruskopf und distalen Verriegelungsschrauben im Humerusschaft in unterschiedlicher Angulation (Stedtfeld et al. 2004). Die minimalinvasive Operationstechnik, die intramedulläre Implantatlage sowie der Erhalt der periostalen Blutversorgung erweisen sich bei der Verwendung dieser Implantate als vorteilhaft (Mittlmeier et al. 2003, Mathews und Lobenhoffer 2007, Murray et al. 2011). Jedoch weisen sowohl Plattenosteosynthesen als auch Nagelsysteme Nachteile auf, die einerseits anwenderbedingt, andererseits auch implantatspezifisch auftreten können. Die aktuelle Literatur vergleicht oftmals die bewährten Verfahren untereinander in Hinblick auf das Patienten-Outcome und der Komplikationen (Pseudarthrosenrate, Humeruskopfnekrosen, Materialdislokationen, Bewegungseinschränkung, Infektionen) (Blum et al. 2009, Gradl et al. 2009, Krettek und Wiebking 2011, Hillbricht et al. 2013). Implantatspezifische Besonderheiten in Hinblick auf die Verletzung anatomischer Strukturen im Bereich des proximalen Humerus werden nur selten dargestellt.

In dieser Arbeit werden zwei Nagelimplantate gegenübergestellt und verglichen.

Das primäre Ziel bestand darin die Lagebeziehungen zwischen den anatomischen Strukturen im Bereich des proximalen Humerus und den eingebrachten Nagelimplantaten bzw. den Verriegelungsschrauben zu analysieren und daraus gegebenenfalls Sicherheitszonen bei der Implantation zu definieren.

Des Weiteren wurde überprüft, ob die Verriegelungsschrauben die potentiellen Frakturfragmente (Tuberculum majus, Tuberculum minus, Kopfkalotte, Schafffragment) ausreichend fixieren und insbesondere der Zweiteilung des Tuberculum majus Rechnung tragen.

Außerdem sollten die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Angulation der proximalen Verriegelungsschrauben beider Nagelsysteme sowie die Konsequenzen eines unterschiedlichen Nageleintrittspunktes in Bezug auf die genannten Strukturen und die knöcherne Einbettung evaluiert werden.

Hierzu wurden die Implantate standardisiert eingebracht und anschließend die Weichteile präparatorisch dargestellt. Die Lagebeziehungen zur langen Bizepssehne,

zum anterioren Anteil des Nervus axillaris, zur lateralen Achsellücke mit Austritt der Arteria circumflexa humeri posterior und des Nervus axillaris, sowie des Nervus radialis und der Arteria profunda brachii im Bereich der distalen Achsellücke bzw. des Trizepsschlitz wurden hierbei untersucht. Die Analyse der knöchernen Einbettung der Implantate erfolgte mittels Computertomographie.

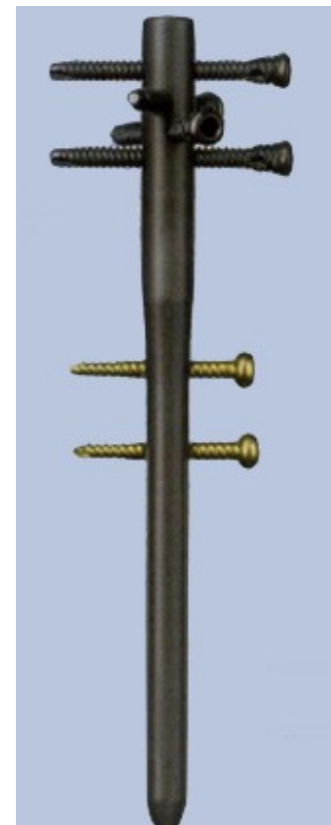
### 3. Material und Methoden

#### 3.1 Studienaufbau

Die Untersuchungen wurden an 10 Oberarmpaaren von Frischleichen (Körperspender des Instituts für Anatomie I, Teichgraben 7, 07743 Jena) im Seitenvergleich durchgeführt. Im ersten Teil wurden zwei unterschiedliche Nagelsysteme über einen zentralen Zugang in 5 Humeruspaare implantiert. Es handelte sich hierbei um das intramedulläre Nagelsystem für den proximalen Humerus Targon® PH der Firma Aesculap (Aesculap AG, Tuttlingen, Deutschland), sowie das T2™ Proximales Humerusnagel System der Firma Stryker (Stryker GmbH & Co. KG, Duisburg, Deutschland). Beide Implantatsysteme werden im klinischen Alltag häufig verwendet. Im zweiten Abschnitt wurde nur der T2™ über einen zentralen bzw. lateralen Eintrittspunkt in 5 Humeruspaare eingebracht.

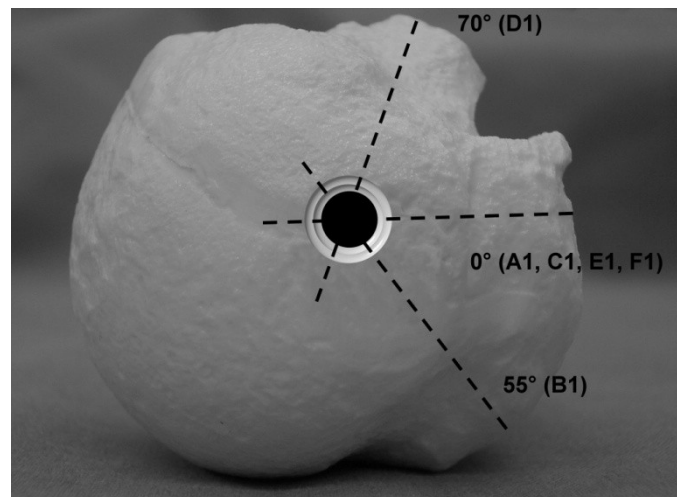
#### 3.2 Targon® PH

Der Targon® PH (**Abb. 7**) ist ein gerader Nagel von 150 mm Länge und einem Durchmesser von 10 mm im proximalen bzw. 8 mm im distalen Nagelbereich. Die proximalen Verriegelungslöcher besitzen einen PEEK-Einsatz (Polyetheretherketon) für einen winkelstabilen Sitz der 4,5 mm Verriegelungsschrauben. Die Schrauben bzw. Nagelbohrungen sind in der folgenden Angulation angeordnet: 0° Verriegelungsschraube für den kranialateralen Anteil des Tuberculum majus (A1) und Verriegelungsschraube für das Kalottenfragment (C1). In 70° Anteversion liegt die Verriegelungsschraube für das Tuberculum minus (D1) sowie in 55° Retroversion die Verriegelungsschraube für den dorsolateralen Anteil des Tuberculum majus (B1). Komplettiert wird das Nagelsystem durch zwei distale Verriegelungslöcher, welche mit 3,5 mm Verriegelungsschrauben (E1, F1) besetzt werden können

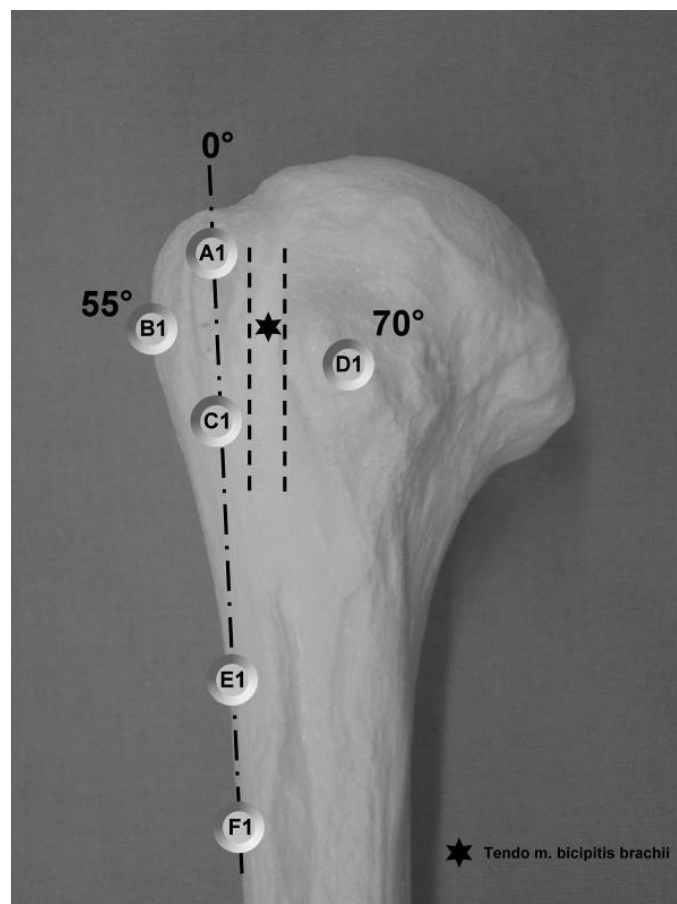


**Abb. 7:** Targon® PH  
(aus Fa. Aesculap 2007)

(Abb. 8, 9). Die Schrauben A1, C1, E1 und F1 sind hierbei auf die zentrale Glenoidebene ausgerichtet (Stedtfeld 2011). Aufgrund der Angulation der Verriegelungsschrauben im proximalen Nagelbereich ist eine Rechts- und Linksversion des Implantates erforderlich. Der Nagel selbst besteht aus der Titanlegierung Ti6Al4V.



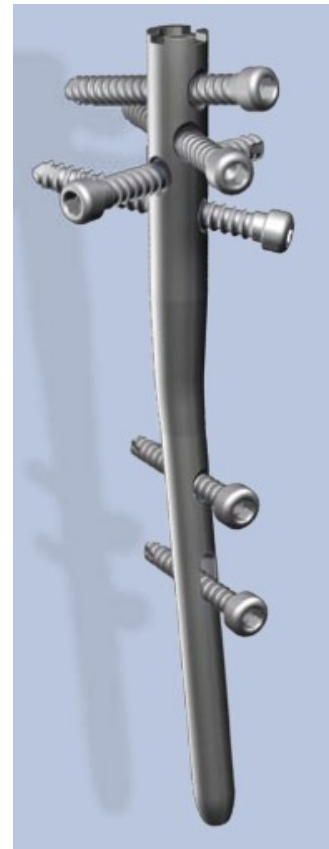
**Abb. 8:** Schema der Schraubenposition und -angulation Targon® PH, Ansicht von kranial



**Abb. 9:** Schema der Schraubenposition und -angulation Targon® PH, Ansicht von ventral

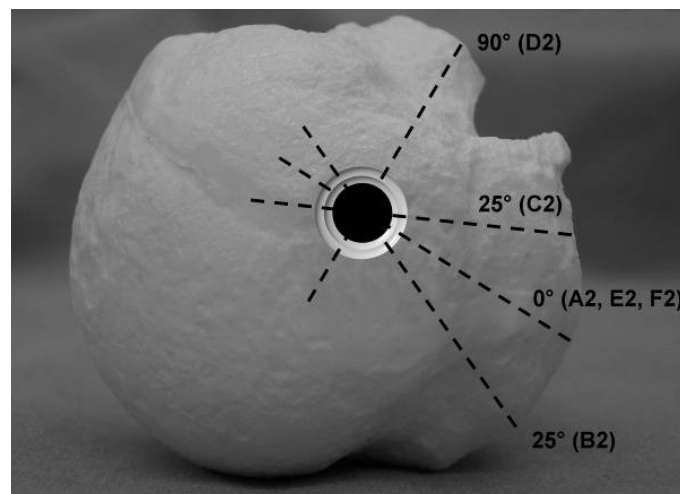
### 3.3 T2™ Proximales Humerusnagel System

Bei diesem Nagel aus der T2-Reihe der Firma Stryker, handelt es sich um einen 150 mm langes Implantat mit 6° Valgusbiegung aus der Titanlegierung Ti6Al4V (**Abb. 10**). Der Durchmesser beträgt 10 mm proximal sowie 8 mm am distalen Ende. Die proximalen Verriegelungsbohrungen besitzen neben einem Gewinde zusätzlich einen Nylonring, um damit die Verriegelungsschrauben sowohl winkelstabil zu verankern als auch ihnen einen verbesserten Halt zu geben. Auch bei diesem Implantat sind die proximalen 5,0 mm Verriegelungsschrauben bzw. Nagelbohrungen in einer spezifischen Angulation angeordnet: 0° Verriegelungsschraube für den kranialateralen Anteil des Tuberculum majus (A2), in 25° Anteversion die Verriegelungsschraube für die Kalotte (C2), in 90° Anteversion die Verriegelungsschraube für das Tuberculum minus (D2) und in 25° Retroversion die Verriegelungsschraube für den dorsolateralen Anteil des Tuberculum majus (B2).

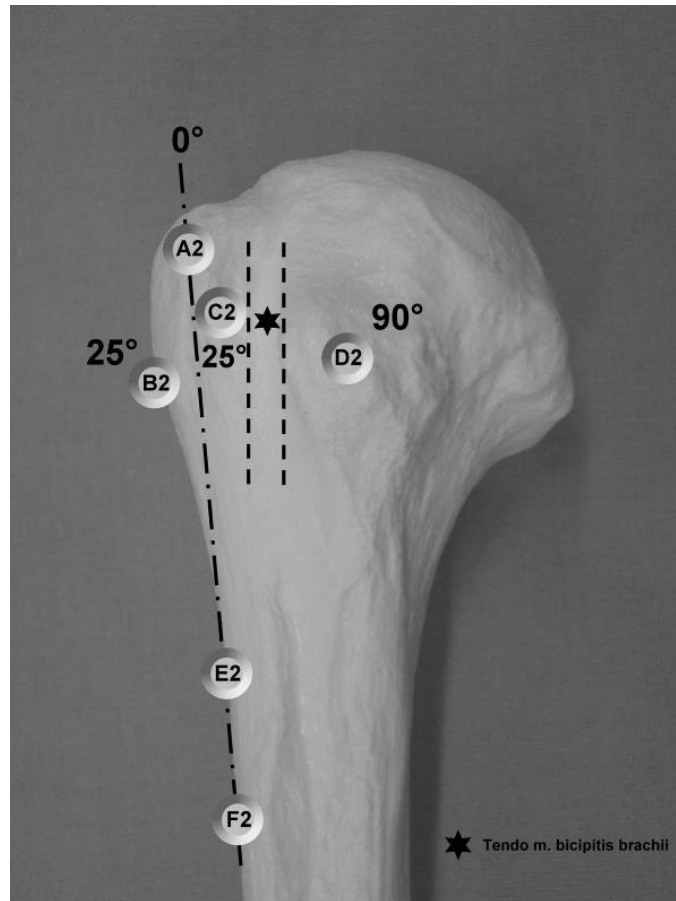


**Abb. 10:** T2™ (aus Fa. Stryker 2007)

Zudem finden sich im distalen Nagelbereich die Bohrungen für die 4,0 mm Verriegelungsschrauben (E2, F2). Sie erlauben eine statische oder dynamische Verriegelung (**Abb. 11, 12**).

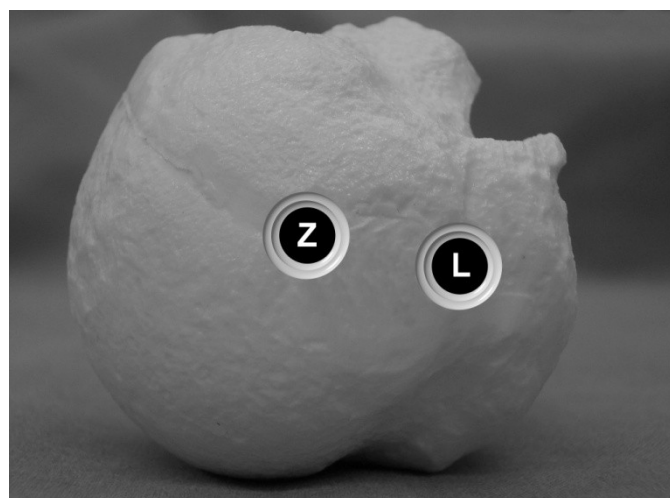


**Abb. 11:** Schema der Schraubenposition und -angulation T2™, Ansicht von kranial



**Abb. 12:** Schema der Schraubenposition und -angulation T2™, Ansicht von ventral

Die Angulation der proximalen Verriegelungsschrauben macht ebenfalls eine Rechts- und Linksversion notwendig. Der T2™ kann ferner über einen zentralen (Z) oder lateralen (L) Eintrittspunkt in den proximalen Humerus implantiert werden (**Abb. 13**).



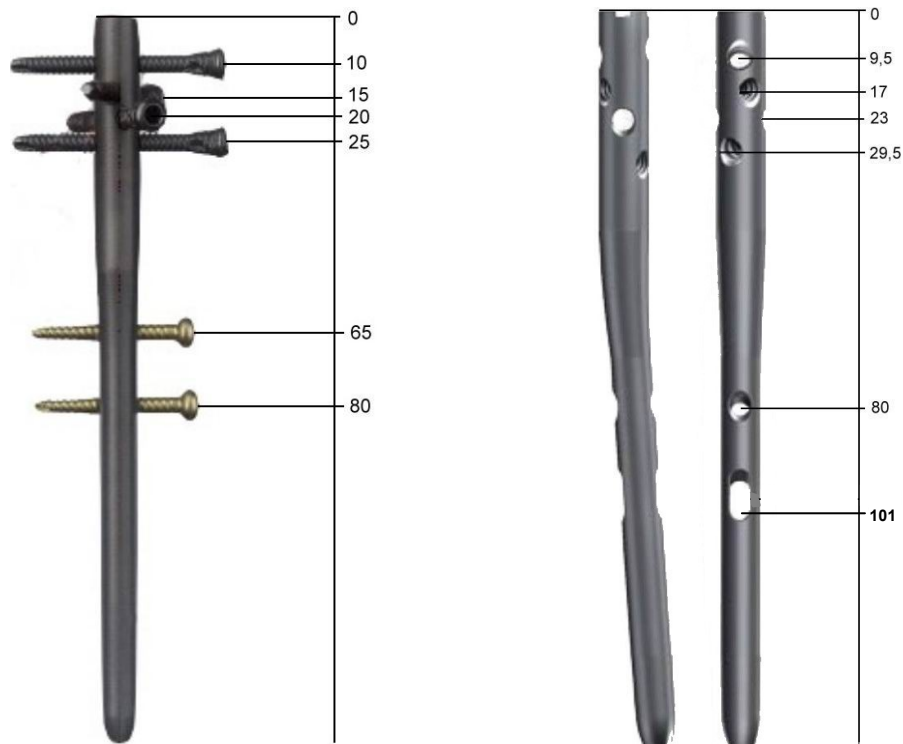
**Abb. 13:** Alternative Eintrittsportale T2™

### 3.4 Implantatvergleich

Bei vergleichbarer Implantatlänge und Implantatdurchmesser unterscheiden sich die untersuchten Marknagelsysteme sowohl im Design des Implantates selbst mit 6° Valgusbiegung des T2™ als auch in der Angulation der proximalen Verriegelungsschrauben für die einzelnen Fragmente. Zudem sind die Bohrungen für die proximalen und distalen Verriegelungsschrauben in unterschiedlichen Höhen in den Nagelimplantaten angeordnet (**Tabelle 1, Abb. 14**).

**Tabelle 1**

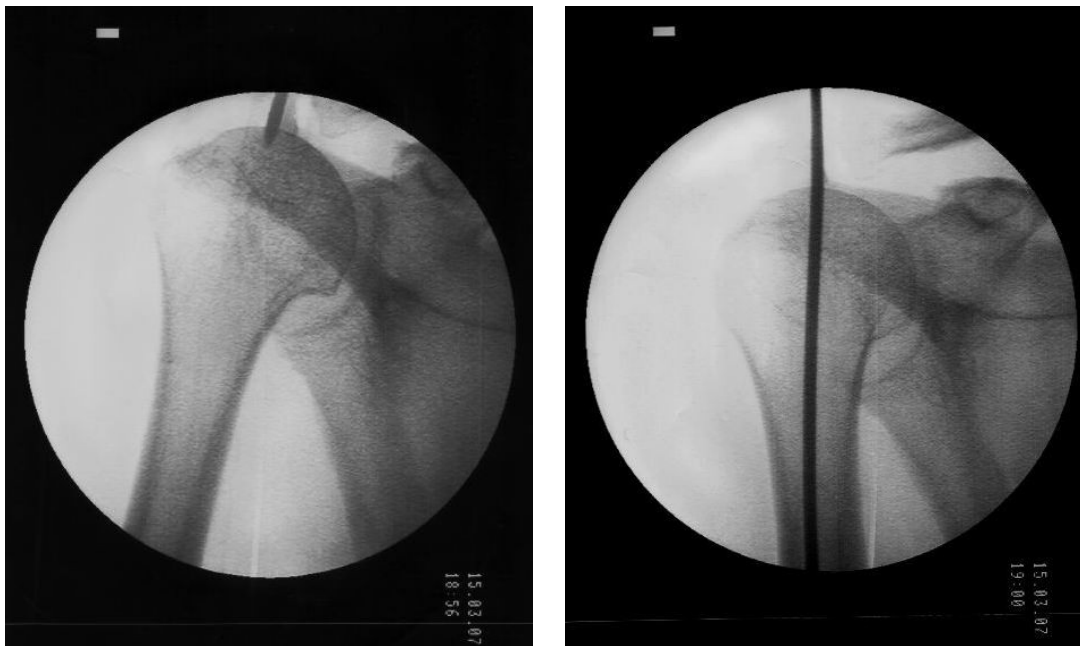
Schraube	Targon® PH	T2™
A	0°	0°
B	55° Retroversion	25° Retroversion
C	0°	25° Anteversion
D	70° Anteversion	90° Anteversion
E	0°	0°
F	0°	0°



**Abb. 14:** Höhe der Verriegelungsbohrungen gemessen ab dem proximalen Nagelende (Angaben in mm): links – Targon® PH; rechts – T2™ (modifiziert aus Fa. Aesculap 2007 bzw. Fa. Stryker 2007)

### 3.5 Operationstechniken

Als Standardzugang wurde entsprechend der Operationsanleitung der Implantathersteller ein anterolateraler Zugang (deltoid-split) gewählt. Nach Spaltung der Faszie und Eröffnung der Bursa subacromialis erfolgte die Längsinzision der Rotatorenmanschette und die Darstellung des Humeruskopfes. Unter Bildwandlerkontrolle in zwei Ebenen wurde der Führungsdraht am kranialsten Punkt der Kalotte eingebracht (**Abb. 15**).



**Abb. 15:** Markierung des höchsten Punktes des Humeruskopfes mittels Führungsdraht und zentrales Einbringen in den Schaft

Abweichend von diesem Operationsschritt wurde für die laterale Nagelimplantation des T2<sup>TM</sup> im zweiten Teil der Untersuchung der Draht zwischen dem lateralen Aspekt der Kalotte und dem Übergang zum Tuberculum majus eingebracht (**Abb. 16**). Anschließend wurde der Humeruskopf über den Führungsdraht mittels Hohlfräse eröffnet. Nach der Montage des Nagels am Zielgerät wurde der Zielbügel entsprechend der zu operierenden Seite (Rechts-Links-Version) eingestellt und der Nagel manuell in den Humerus eingeführt. Die Einbringtiefe des Nagels kann für den Targon® PH mittels einer Tiefenmesslehre bestimmt werden und lag bei 5 mm. Für den T2<sup>TM</sup> dienen eingefräste Ringe im Zielgerät bei 2 mm und 5 mm für die korrekte Einbringtiefe. Auch hier wurde sie bei 5 mm gewählt und die Lage mittels Bildwandler kontrolliert.





**Abb. 16:** Übergang der Kalotte zum Tuberculum majus und Einbringen des Führungsdrahtes bei lateraler Implantationstechnik des T2™

Danach erfolgte die Ausrichtung des Nagels in Bezug auf die Rotation. Für den Targon® PH wurde hierzu der Bizepssehnensulcus getastet und die entsprechende Bohrhülse im Zielgerät auf das Tuberculum minus ausgerichtet. Konnte von einer sicheren Platzierung der entsprechenden Schraube ausgegangen werden, wurde die Bohrhülse im Zielgerät nach dorsal umgesetzt. Für den T2™ kann die korrekte Rotation durch einen Kirschner-Draht, der durch das Zielgerät geführt wird bestimmt werden. Dieser wird in einer Linie mit der Unterarmachse bei 90° gebeugtem Ellenbogengelenk eingestellt (**Abb. 17**). Nach erfolgter Rotationsausrichtung wurden die Bohrungen für die proximalen Verriegelungsschrauben vorgenommen. Bei beiden Nägeln wurde zuerst mit der Fixation des kranio-lateralen Anteils des Tuberculum majus begonnen (A1 bzw. A2). Nach einer Stichinzision der Haut und Aufbringen des Obturators und der Gewebeschutzhülse auf den Knochen wurde für den Targon® PH der Schraubenkanal mittels Zentrierbohrer (4,5 mm) und Spiralbohrer (3,5 mm) aufgebohrt und die erste Verriegelungsschraube implantiert. Bei der Präparation des Schraubenkanals für den T2™ wurde ein 3,5 mm Bohrer verwendet. Die Schraubenlänge wurde mittels Messlehre bestimmt. Anschließend wurden die anderen Schraubenplätze (B und C) belegt, wobei in selber Art und Weise vorgegangen wurde. Zuletzt erfolgte die Platzierung der Schraube D1 bzw. D2 für das Tuberculum minus. Hierzu musste für den T2™ das Zielgerät nach ventral geschwenkt werden. Nach Abschluss der proximalen Schraubenpositionierung

wurden nun die Verriegelungslöcher im Humerusschaft mit entsprechenden Verriegelungsschrauben besetzt. Für den Targon® PH wurde distal ein 2,7 mm Bohrer verwendet, für den T2™ ein 3,5 mm Bohrer. Nach der Verriegelung erfolgte die letzte Kontrolle der Implantatlage unter dem Bildwandler in zwei Ebenen.



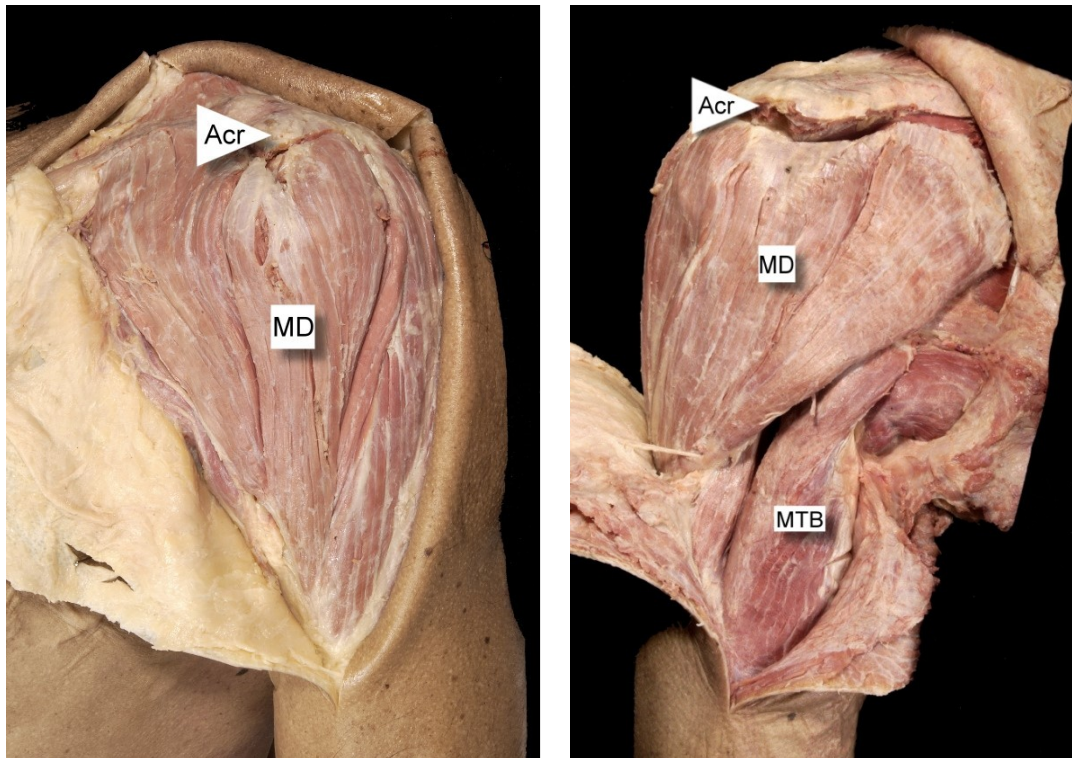
**Abb. 17:** Rotationsausrichtung des T2™ (aus Fa. Stryker 2007)

### 3.6 Radiologische Untersuchungen

Nach der Instrumentierung wurden alle Schulterpaare einer Computertomographie an einem GE-Lightspeed 16-Zeiler Multidetektor-CT unterzogen. Hier wurden die Präparate in 1.25/5.62 mm axialer Schnittführung untersucht. Es erfolgte die dreidimensionale Rekonstruktion, Lagebestimmung und Winkelmessung der eingebrachten proximalen Verriegelungsschrauben. Sofern das Schraubenimplantat nicht in der gewünschten Position eingebracht worden ist und damit die relevanten Fragmente (Tuberculum majus kraniallateral, Tuberculum majus dorsolateral, Tuberculum minus und Kalotte) nicht fixiert wurden, erfolgte die Bestimmung des Korrekturwinkels für die entsprechende Schraube.

### 3.7 Anatomische Präparation

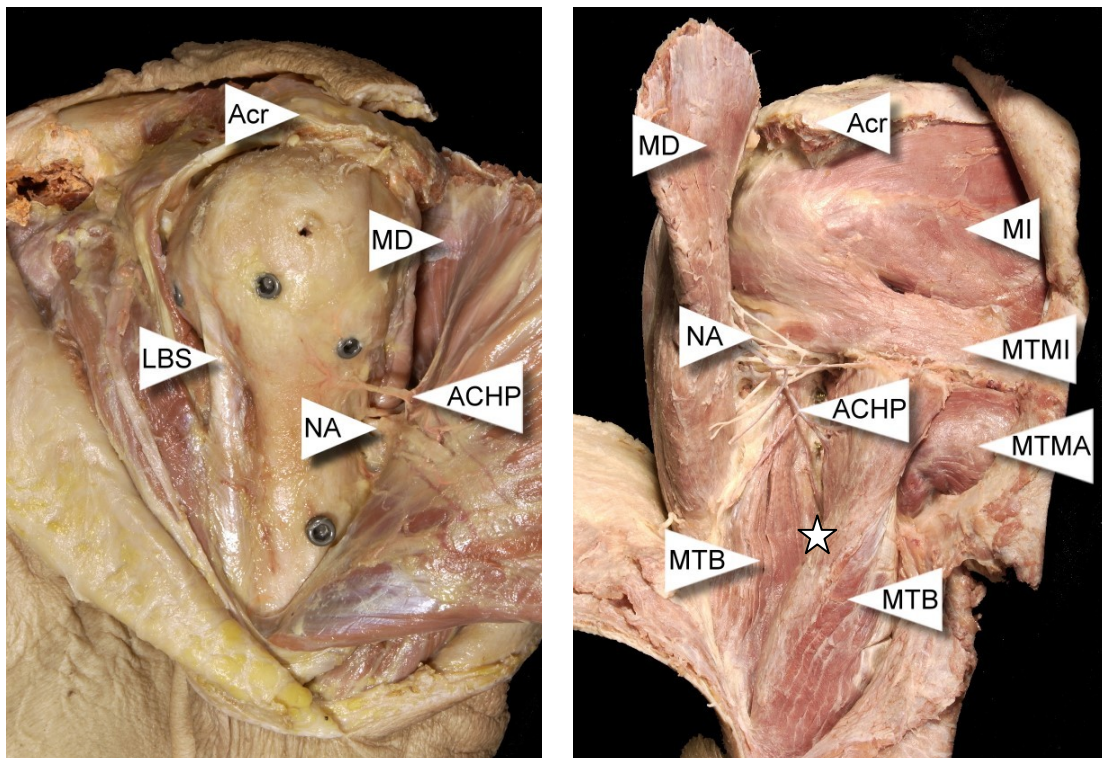
Nach der Nagelimplantation wurden alle Schultern gleichermaßen präpariert. Beginnend mit einem Hautschnitt in Erweiterung des OP-Zuganges nach ventral über die Clavicula und nach dorsal über die Spina scapulae wurden Haut und subkutanes Gewebe vom Musculus deltoideus entfernt und der Muskel ventral und dorsal dargestellt (**Abb. 18**).



**Abb. 18:** Situs nach Präparation des Subkutangewebes: links – ventrale Ansicht mit M. deltoideus (MD) und Acromion (Acr); rechts – dorsale Ansicht, M. triceps brachii (MTB)

Der Muskel wurde von seinen Ursprüngen an Clavicula, Acromion und Scapula scharf abgetrennt und abgehoben. Der ventrolaterale Teil des Humeruskopfes inklusive der eingebrachten Verriegelungsschrauben und die lange Bizepssehne wurden dargestellt. Darüber hinaus erfolgte die Präparation der lateralen Achsellücke mit Nervus axillaris und Arteria circumflexa humeri posterior von dorsal. Die beiden Hauptäste des Nervus axillaris wurden nach ventral und dorsal verfolgt (**Abb. 19**). Die distalen Verriegelungsschrauben im Humerusschaft wurden von dorsal aufgesucht und zudem die distale Achsellücke mit Nervus radialis und Arteria profunda brachii präparatorisch dargestellt. Die jeweiligen Präparationsschritte sowie die Positionen der Verriegelungsschrauben wurden bilddokumentiert. Folgende anatomische Strukturen wurden als relevant festgelegt: Lange Bizepssehne (LBS), Arteria circumflexa humeri posterior (ACHP), Nervus axillaris (NA), Nervus radialis (NR) und Arteria profunda brachii (APB). Für die Auswertung wurden neben diesen Strukturen zudem 4 Regionen definiert. Region 1 umfasste den ventrolateralen Humeruskopf und die Abstände der proximalen Verriegelungsschraubenköpfe A-D zur langen Bizepssehne. In Region 2 wurde die Entfernung der Schraubenspitzen der distalen Verriegelungsschrauben E und F zu Nervus axillaris und Arteria circumflexa humeri posterior (laterale Achsellücke) sowie in Region 3 zu Nervus

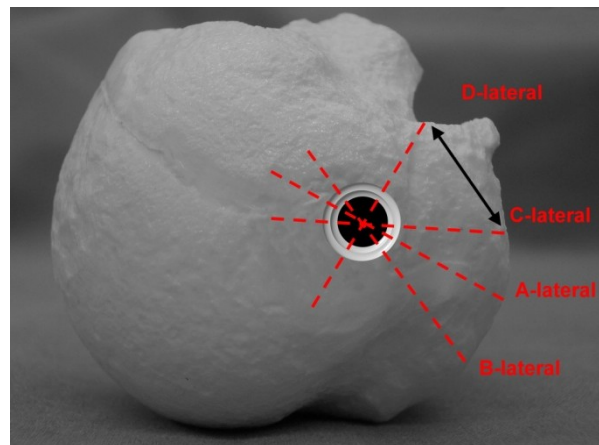
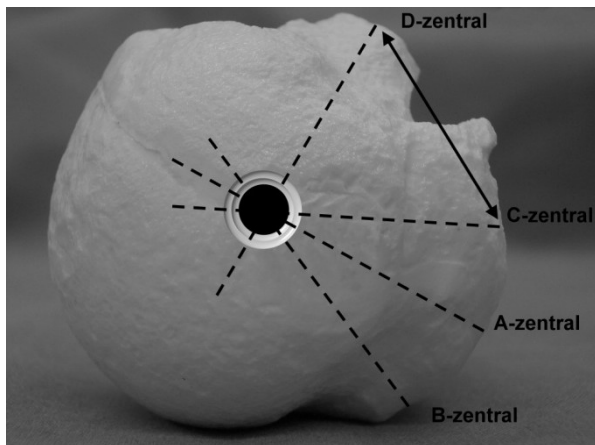
radialis und Arteria profunda brachii (distale Achsellücke) ermittelt. In Region 4 wurde der Abstand der distalsten proximalen Verriegelungsschraube, d.h. Schraubenkopf C des Targon® PH bzw. Schraubenkopf B des T2™ zum ventralen Ast des Nervus axillaris gemessen (Vergleich Abb. 9 und 12). Die relevanten anatomischen Strukturen wurden auf Schädigungen untersucht bzw. die Entfernung zu den Verriegelungsschrauben mittels Messzirkel in Millimeter erfasst. Ein gemessener Abstand von < 1 mm galt hierbei als Schädigung.



**Abb. 19:** Linkes Schultergelenk nach partiellem Ablösen des M. deltoideus (MD): links – ventrale Ansicht, Region 1; rechts – dorsale Ansicht, Regionen 2 und 3, Caput laterale und longum des M. triceps brachii (MTB) verdecken teilweise die distale Achsellücke (Sternmarkierung)

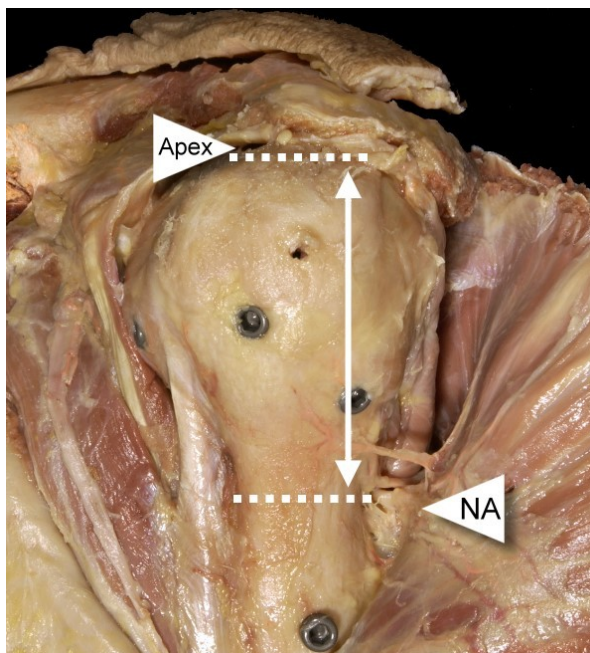
Für die vergleichende Untersuchung des T2™ nach der Implantation über einen zentralen bzw. lateralen Eintrittspunkt wurde zusätzlich in Region 1 der Abstand der proximalen Verriegelungsschrauben D und C zueinander ermittelt. Hiermit sollte analysiert werden, inwieweit es durch die laterale Implantation zu einer Größenänderung des Korridors um den Sulcus bicipitalis bzw. die lange Bizepssehne kommt und diese möglicherweise geschädigt wird (**Abb. 20**).



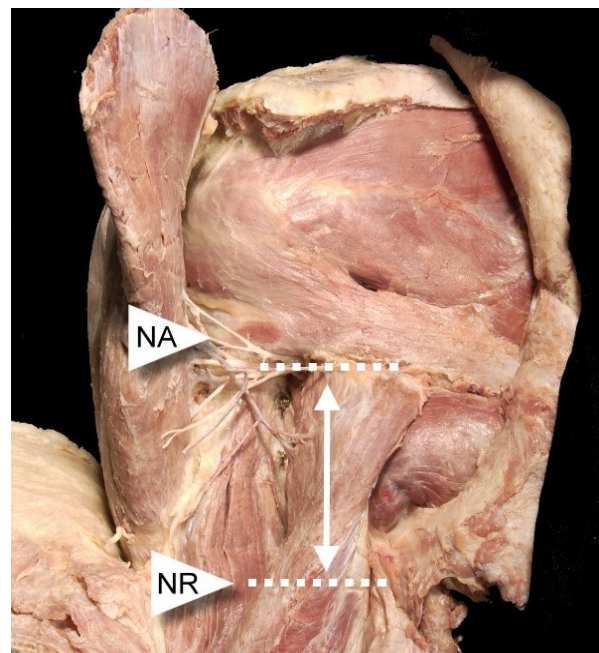


**Abb. 20:** Links – kraniale Aufsicht Humeruskopf mit den proximalen Verriegelungsschrauben A-D bei zentraler Implantation des T2™, der Pfeil markiert den Schraubenabstand zwischen C und D; rechts – lateraler Eintrittspunkt des T2™ mit Positionsänderung der Verriegelungsschrauben C und D um den Bizepssehnnensulcus bei gleicher Rotation des Nagelsystems

Zusätzlich wurde bei allen Präparaten die Distanz zwischen dem höchsten Punkt des Tuberculum majus und dem ventralen Ast des Nervus axillaris (**Abb. 21**) sowie zwischen Nervus axillaris am Austritt der lateralen Achsellücke und Nervus radialis im Bereich der distalen Achsellücke gemessen (**Abb. 22**).



**Abb. 21:** Distanz zwischen N. axillaris (NA) und der T. majus-Spitze



**Abb. 22:** Distanz zwischen N. axillaris (NA) und N. radialis (NR)

### **3.8 Statistik**

Die statistische Auswertung erfolgte durch explorative Datenanalyse und Prüfung auf Normalverteilung mit dem Test nach Shapiro-Wilk. Zum Vergleich der Gruppen untereinander wurde der parameterfreie Mann-Whitney-Test verwendet (Software: IBM SPSS, Version 20), wobei P-Werte  $< 0,05$  als signifikant erachtet wurden.

## 4. Ergebnisse

Alle 10 Schulterpaare konnten vollständig präpariert und ausgewertet werden. **Tabelle 2** zeigt die Abstände des ventralen Astes des Nervus axillaris zum höchsten Punkt des Tuberculum majus (Apex) sowie die Distanz zwischen Nervus axillaris am Austritt der lateralen Achsellücke zum Nervus radialis in der distalen Achsellücke.

**Tabelle 2**

Anatomische Struktur	Distanz in mm		
	MW	SD	Streuung
N = 20			
Apex T. majus – N. axillaris	44,3	2,6	41-50
N. axillaris – N. radialis	34,6	4,0	28-40

### 4.1 Targon® PH vs. T2™

Der Vergleich der beiden Nagelimplantate in Bezug auf die Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen und die ermittelten Abstände sind in **Tabelle 3 und 4** aufgeführt. Durch die Verriegelungsschraube A für das kranio laterale Fragment des Tuberculum majus wurde in keinem Fall eine der genannten Strukturen verletzt. Sie liegt weit außerhalb der kritischen Zonen und wurde nicht in die Auswertung integriert. Für Region 4 wurden die Präparate aus dem zweiten Teil der Untersuchung hinzugenommen.

**Tabelle 3**

Anatomische Struktur	Targon® PH			T2™		
	Gesamt	Geschädigt	Nicht Geschädigt	Gesamt	Geschädigt	Nicht Geschädigt
<b>Verriegelungsschraube B (Tuberculum majus dorsolateral)</b>						
Lange Bizepssehne	5	0	5	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube C (Kopfkalotte)</b>						
Lange Bizepssehne	5	0	5	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube D (Tuberculum minus)</b>						
Lange Bizepssehne	5	3	2	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube E</b>						
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior	5	1	4	5	0	5
N. radialis, A. profunda brachii	5	0	5	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube F</b>						
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior	5	0	5	5	0	5
N. radialis, A. profunda brachii	5	0	5	5	5	0
<b>Distalste proximale Verriegelungsschraube</b>						
Ventraler Ast N. axillaris	5	0	5	15	0	15

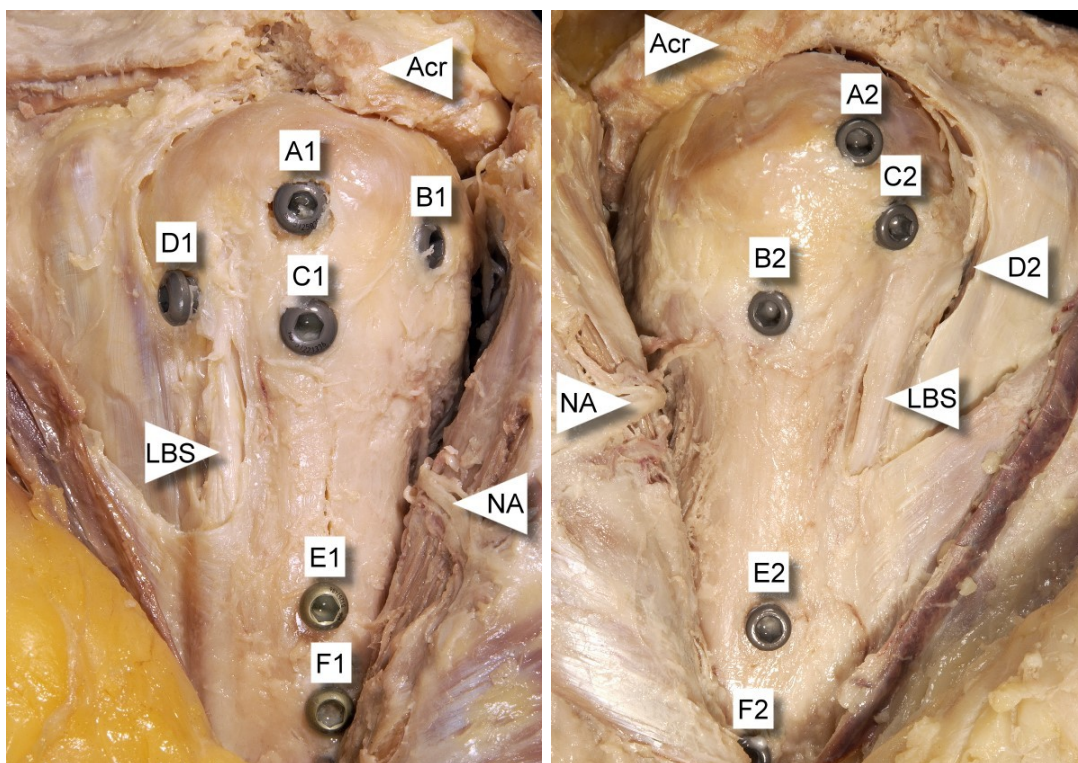


Tabelle 4

Anatomische Struktur – Schraubenimplantat	Targon® PH (n=5)			T2™ (n=5)			
	Distanz in mm			Distanz in mm			
	MW	SD	Streuung	MW	SD	Streuung	p-Wert
Region 1							
Lange Bizepssehne – Verriegelungsschraube B (Tuberculum majus dorsolateral)	44,6	10,1	27-52	19,8	6,5	13-30	0,016
Lange Bizepssehne – Verriegelungsschraube C (Kopfkalotte)	18,2	6,6	7-23	7	3,9	3-12	0,032
Lange Bizepssehne – Verriegelungsschraube D (Tuberculum minus)	0,4	0,5	0-1	9	5,1	3-16	0,008
Region 2							
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior – Verriegelungsschraube E	1,6	1,5	0-4	18,2	3,1	13-21	0,008
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior – Verriegelungsschraube F	16,6	1,5	15-19	38,2	3,1	33-41	0,008
Region 3							
N. radialis, A. profunda brachii – Verriegelungsschraube E	32	3,9	28-38	15,4	3,8	9-19	0,008
N. radialis, A. profunda brachii – Verriegelungsschraube F	17	3,9	13-23	0	0	0	0,007
Region 4	Targon® PH (n=5)			T2™ (n=15)			
	Distanz in mm			Distanz in mm			
Ventraler Ast N. axillaris – distalste proximale Verriegelungsschraube	18,4	4,4	12-23	3,3	2,0	1-7	<0,001

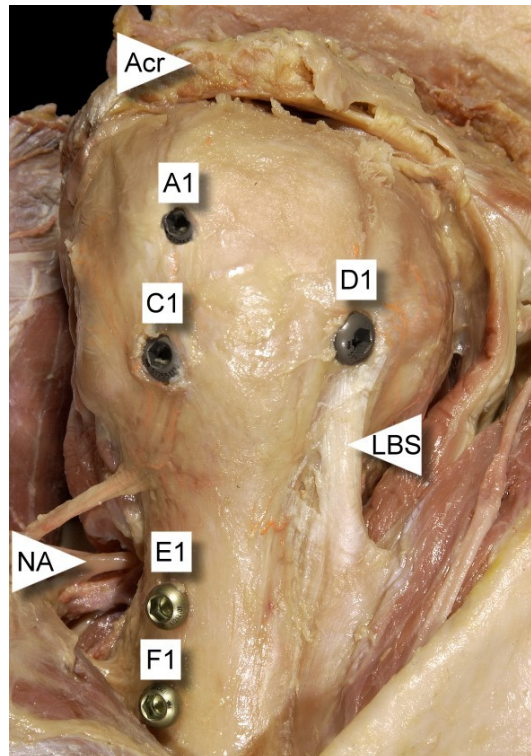
### Region 1:

Statistisch signifikante Unterschiede zeigten sich für die Verriegelungsschraube B1 des Targon® PH mit größeren Abständen zur langen Bizepssehne ( $p = 0,016$ ). Die Verriegelungsschraube C1 des Targon® PH für die Kopfkalotte lag ebenfalls signifikant weiter entfernt von der langen Bizepssehne ( $p = 0,032$ ) als die Verriegelungsschraube C2 des T2™. In diesem Studienabschnitt wurde durch die Verriegelungsschrauben B und C bei beiden Implantaten in keinem Fall die lange Bizepssehne verletzt (**Abb. 23**).



**Abb. 23:** Typische Anordnung der Verriegelungsschrauben im proximalen Humerus ventrolateral nach Ablösen des M. deltoideus und deren Beziehung zu langer Bizepssehne (LBS) und ventralem Ast des N. axillaris (NA): links – Targon® PH; rechts – T2™

Statistisch signifikante Vorteile ergaben sich auch für die Schraube D2 des T2™ für das Tuberculum minus ( $p = 0,008$ ). Sie hatte einen größeren Abstand zur langen Bizepssehne, als D1 des Targon® PH. In 3 von 5 Fällen wurde die lange Bizepssehne durch die Schraube D1 des Targon® PH verletzt (**Abb. 24**).

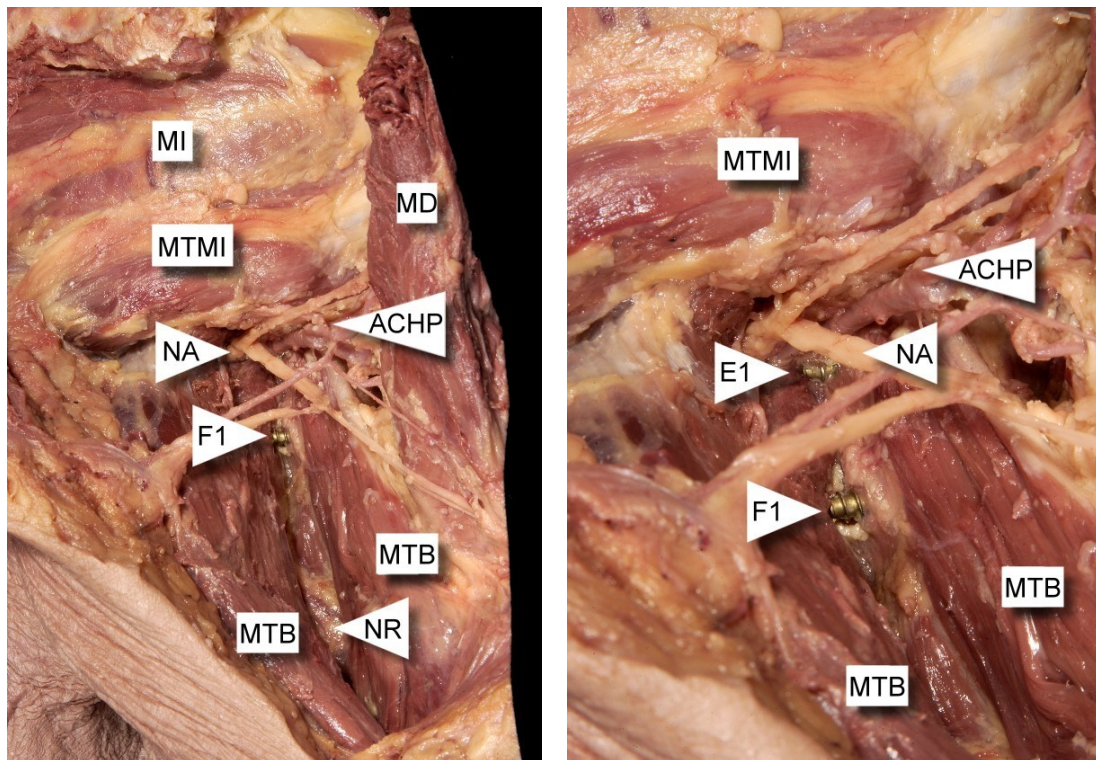


**Abb. 24:** Schädigung der langen Bizepssehne (LBS) durch die Verriegelungsschraube D1 (Targon® PH)

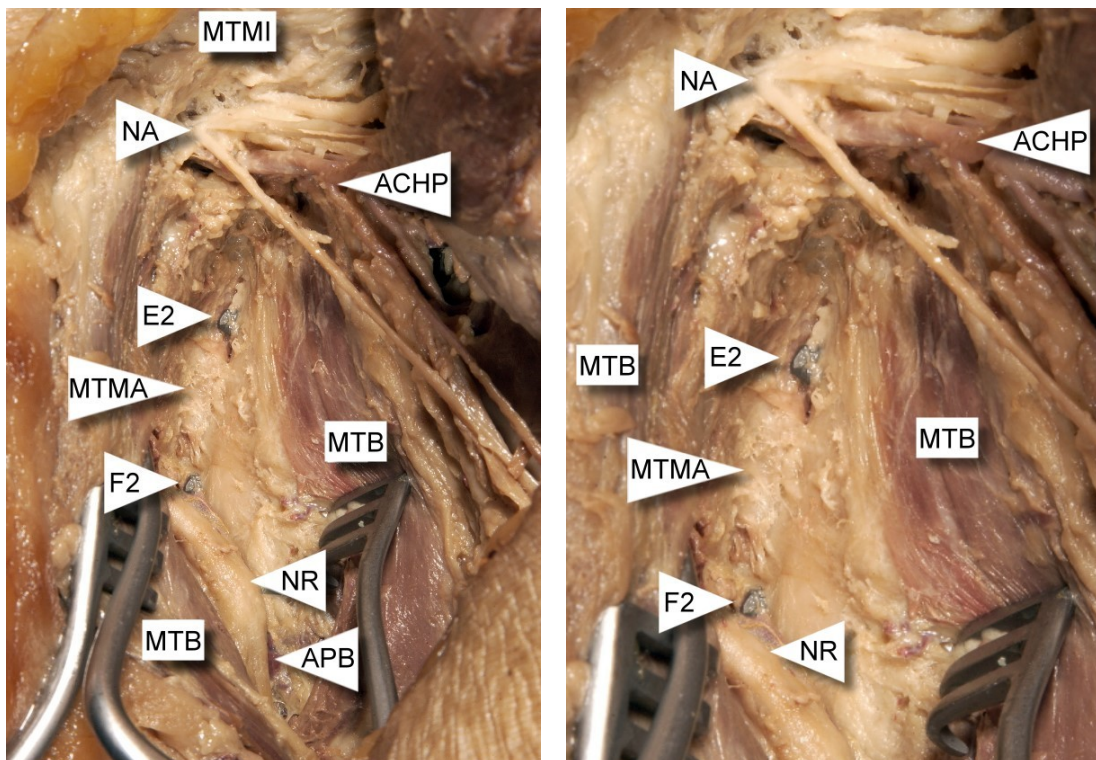
## Region 2:

Deutlichen Bezug zu Nervus axillaris und Arteria circumflexa humeri posterior wies die proximale der distalen Verriegelungsschrauben des Targon® PH auf. Im Mittel lag die Verriegelungsschraube E1 nur 1,6 mm von den Strukturen entfernt, wobei sie in 1 von 5 Fällen einen Abstand von  $< 1$  mm aufwies. F1 lag mit 16,6 mm in einer ausreichenden Entfernung zu den relevanten Strukturen der lateralen Achsellücke (**Abb. 25**). Der T2<sup>TM</sup> erzielte signifikant bessere Ergebnisse in Bezug auf Nervus axillaris und Arteria circumflexa humeri posterior durch die distalen Verriegelungsschrauben E2 und F2 ( $p = 0,008$ ). E2 konnte in einer Distanz von 18,2 mm zur lateralen Achsellücke gefunden werden, die Verriegelungsschraube F2 entsprechend in 38,2 mm (**Abb. 26**).





**Abb. 25:** Links - Übersichtsansicht einer rechten Schulter von dorsal nach Implantation des Targon® PH mit Darstellung der lateralen und distalen Achsellücke sowie Lagebeziehung der Verriegelungsschraubenspitzen E1 und F1 (E1 verdeckt); rechts – vergrößerter Ausschnitt



**Abb. 26:** Links – Übersichtsansicht einer rechten Schulter von dorsal nach Implantation des T2™ mit Darstellung der lateralen und distalen Achsellücke sowie Lagebeziehung der Verriegelungsschraubenspitzen E2 und F2; rechts – vergrößerter Ausschnitt

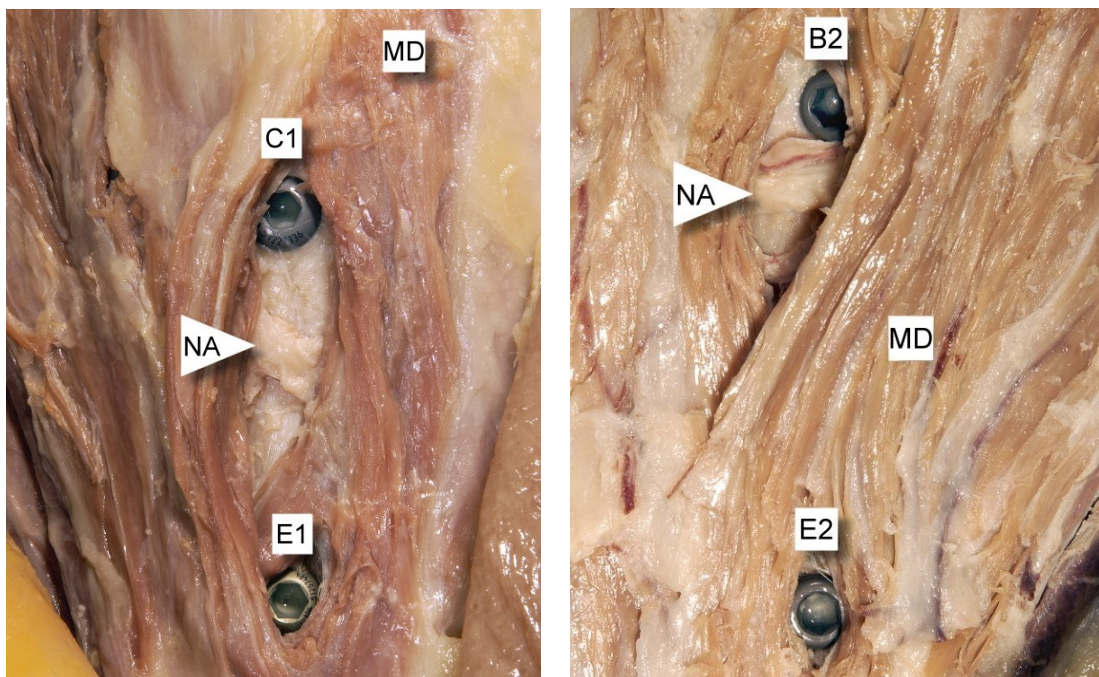


### Region 3:

Für die distalen Verriegelungsschrauben in Bezug zur distalen Achsellücke ergaben sich signifikante Vorteile für den Targon® PH. Die proximale der distalen Verriegelungsschrauben E1 lag mit 32 mm in einem signifikant weiteren Abstand zu den relevanten Strukturen der distalen Achsellücke als E2 ( $p = 0,008$ ). Durch die Schrauben E1 und E2 wurden in keinem Fall die relevanten Strukturen der distalen Achsellücke geschädigt. Die distalste Verriegelungsschraube F1 lag mit 17 mm ebenfalls signifikant weiter entfernt von Nervus radialis und Arteria profunda brachii als die vergleichbare Schraube des T2™ ( $p = 0,007$ ) (**Abb. 25**). F2 konnte in allen Fällen unterhalb des Ansatzes des Musculus teres major in der distalen Achsellücke und damit im Verlauf des Nervus radialis und der Arteria profunda brachii aufgefunden werden (**Abb. 26**).

### Region 4:

Für die Schraube C1 des Targon® PH ergaben sich Abstände von 18,4 mm zum ventralen Ast des Nervus axillaris. Für die Verriegelungsschraube B2 des T2™ wurde eine mittlere Entfernung von 3,3 mm gemessen. Diese Unterschiede sind mit  $p < 0,001$  hoch signifikant. Eine Schädigung des Nervus axillaris fand sich in beiden Gruppen nicht (**Abb. 27**).



**Abb. 27:** Region 4 mit M. deltoideus (MD) und dem ventralen Ast des N. axillaris (NA) sowie die Lagebeziehung zu der distalsten der proximalen Verriegelungsschrauben: links – C1 des Targon® PH; rechts – B2 des T2™

## 4.2 T2™ zentral vs. T2™ lateral

Die Lagebeziehungen der relevanten anatomischen Strukturen zu den Verriegelungsschrauben und die ermittelten Distanzen sind in **Tabelle 5** und **6** aufgeführt.

**Tabelle 5**

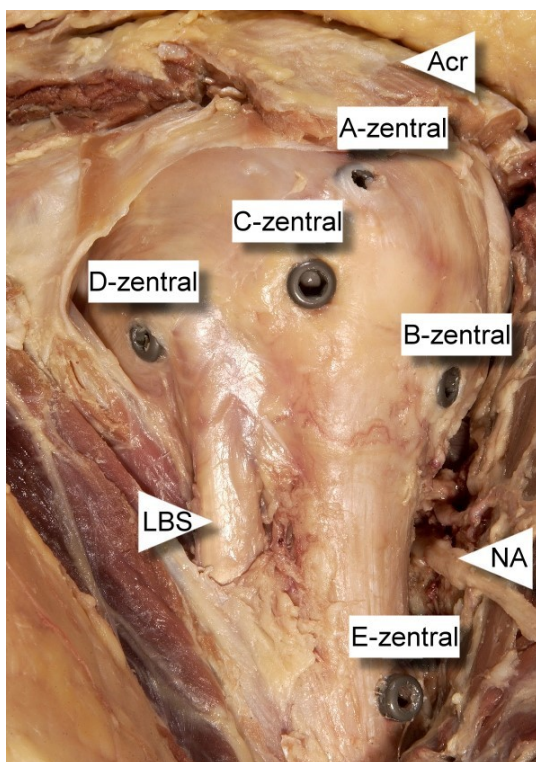
Anatomische Struktur	T2™ zentral			T2™ lateral		
	Gesamt	Geschädigt	Nicht Geschädigt	Gesamt	Geschädigt	Nicht Geschädigt
<b>Verriegelungsschraube B (Tuberculum majus dorsolateral)</b>						
Lange Bizepssehne	5	0	5	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube C (Kopfkalotte)</b>						
Lange Bizepssehne	5	1	4	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube D (Tuberculum minus)</b>						
Lange Bizepssehne	5	0	5	5	2	3
<b>Verriegelungsschraube E</b>						
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior	5	0	5	5	0	5
N. radialis, A. profunda brachii	5	0	5	5	0	5
<b>Verriegelungsschraube F</b>						
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior	5	0	5	5	0	5
N. radialis, A. profunda brachii	5	5	0	5	5	0

Tabelle 6

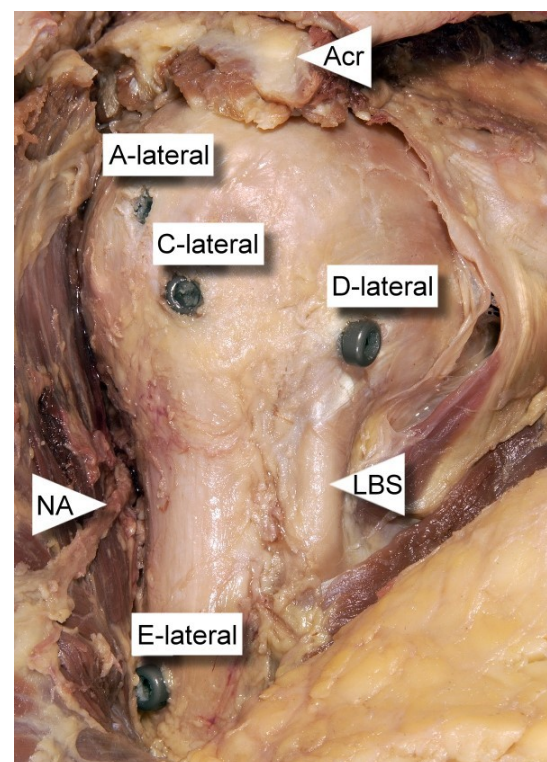
Anatomische Struktur – Schraubenimplantat	T2™ zentral (n=5)			T2™ lateral (n=5)			
	Distanz in mm			Distanz in mm			
	MW	SD	Streuung	MW	SD	Streuung	p-Wert
Region 1							
Lange Bizepssehne – Verriegelungsschraube B (Tuberculum majus dorsolateral)	19,8	4	15-25	20,4	5	14-27	0,841
Lange Bizepssehne – Verriegelungsschraube C (Kopfkalotte)	2,4	2,8	0-7	8,8	3,6	5-13	0,032
Lange Bizepssehne – Verriegelungsschraube D (Tuberculum minus)	11,4	3,2	6-14	3,4	3,6	0-8	0,016
Verriegelungsschraube C – Verriegelungsschraube D	20,8	3,6	15-24	16,4	4,3	10-20	0,056
Region 2							
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior – Verriegelungsschraube E	21,4	3,1	18-26	21,4	3,4	18-27	1,000
N. axillaris, A. circumflexa humeri posterior – Verriegelungsschraube F	41,4	3,1	38-46	41,4	3,4	38-47	1,000
Region 3							
N. radialis, A. profunda brachii – Verriegelungsschraube E	14,2	4,1	10-19	14,2	4,3	9-18	0,695
Verriegelungsschraube F – N. radialis, A. profunda brachii	0	0	0	0	0	0	1,000

### Region 1:

Für die Verriegelungsschraube B zeigten sich keine signifikanten Distanzunterschiede bei unterschiedlichen Nagel Eintrittspunkten ( $p = 0,841$ ). Statistisch signifikante Vorteile ergaben sich für die Verriegelungsschraube C-lateral gegenüber der Verriegelungsschraube C-zentral mit einem größeren Abstand zur langen Bizepssehne ( $p = 0,032$ ) (**Abb. 28, 29**). In 1 von 5 Fällen kam es zu einer Schädigung der langen Bizepssehne durch die Verriegelungsschraube C-zentral. Die Verriegelungsschraube D-lateral für das Tuberculum minus lag signifikant näher an der langen Bizepssehne als D-zentral ( $p = 0,016$ ). In 2 von 5 Fällen wurde die lange Bizepssehne durch die Schraube D-lateral geschädigt (**Abb. 29**). Der Korridor zwischen den Schrauben C und D ändert sich bei der lateralen Implantation nicht signifikant ( $p = 0,056$ ).



**Abb. 28:** Situation der Verriegelungsschrauben in Region 1 nach zentraler Nagelimplantation des T2<sup>TM</sup> in einen linken proximalen Humerus



**Abb. 29:** Lagebeziehung der Verriegelungsschrauben nach Wahl eines lateralen Eintrittspunktes des T2<sup>TM</sup> in eine rechte Schulter, Verriegelungsschraube B dorsal verdeckt

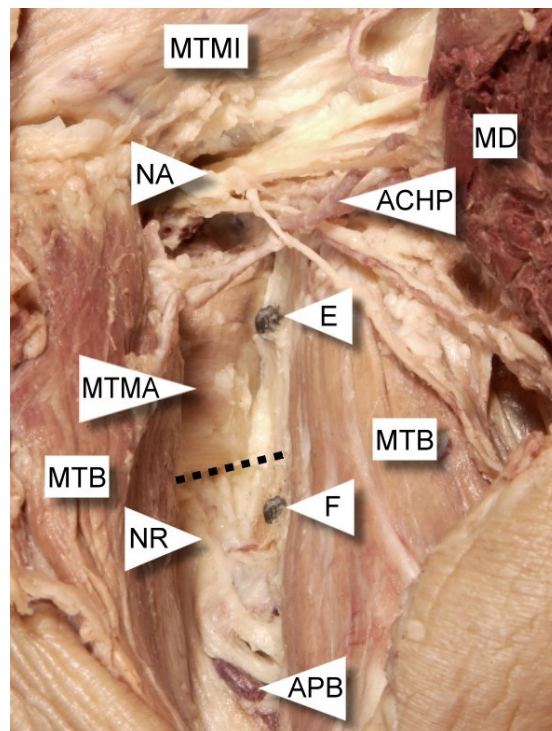


### Region 2:

Die Spitzen der Verriegelungsschrauben E und F lagen mit 21,4 mm bzw. 41,4 mm in ausreichendem Abstand zur lateralen Achsellücke. Ein signifikanter Unterschied zwischen zentraler und lateraler Implantation konnte nicht festgestellt werden.

### Region 3:

Die proximale der distalen Verriegelungsschrauben E wies mit 14,2 mm einen ausreichenden Abstand zu den relevanten Strukturen der distalen Achsellücke auf. Ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen konnte für diese Schraube nicht festgestellt werden ( $p = 0,695$ ). Die distale Verriegelungsschraube F lag in allen Fällen unmittelbar im Verlauf des Nervus radialis und der Arteria profunda brachii (**Abb. 30**). Dabei konnten keine signifikanten Veränderungen der Distanzen durch einen anderen Nageleintrittspunkt ermittelt werden.



**Abb. 30:** Dorsale Ansicht einer rechten Schulter nach Präparation der lateralen und distalen Achsellücke, die gestrichelte Linie markiert den Unterrand des M. teres major, die Verriegelungsschraube F liegt in allen Fällen unterhalb davon im Verlauf der relevanten Strukturen N. radialis (NR) und A. profunda brachii (APB)

### 4.3 Radiologische Auswertung

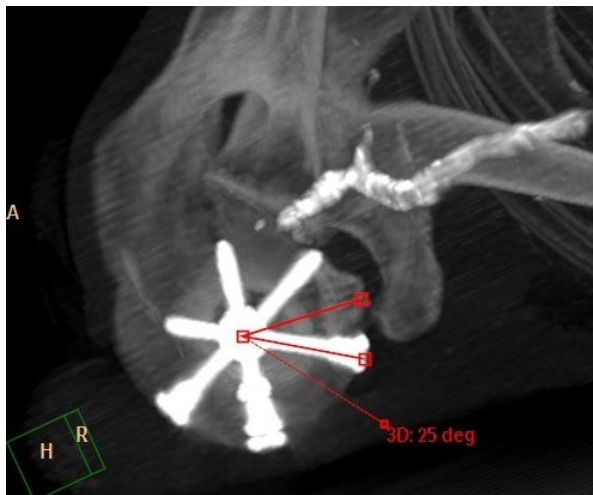
Die Daten der radiologischen Auswertung sind in **Tabelle 7** aufgeführt.

**Tabelle 7**

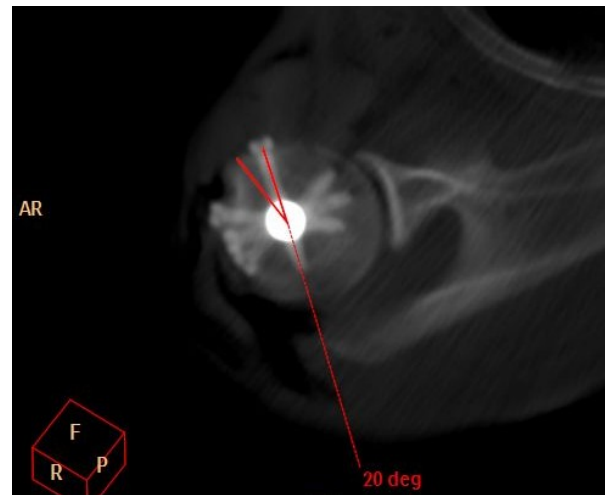
Anatomische Struktur (Verriegelungsschraube)	Targon® PH (n = 5)		T2™ zentral (n = 10)		T2™ lateral (n = 5)	
	Fixation	Keine Fixation	Fixation	Keine Fixation	Fixation	Keine Fixation
T. majus kranio-lateral (A)	5	0	10	0	5	0
T. majus dorso-lateral (B)	4	1	10	0	5	0
Kalotte (C)	5	0	10	0	5	0
T. minus (D)	1	4	7	3	3	2

Für den kranio-lateralen Anteil des Tuberculum majus zeigte sich bei allen Präparaten eine sichere Fixation durch die Schraube A. Der dorso-laterale Anteil wurde durch das Schraubenimplantat B1 des Targon® PH einmal nicht fixiert (Korrekturwinkel 25° Anteversion). Bei allen aufgeführten Implantaten bzw. Implantationstechniken konnte die Kalotte durch die Verriegelungsschraube C regelrecht gefasst werden. Einmal lag jedoch der Schraubenkopf bei zentraler Implantation des T2™ im Sulcus bicipitalis. Die größten Unterschiede ergaben sich für das Tuberculum minus. In Anlehnung an die anatomische Auswertung und Distanzmessung zeigte die Verriegelungsschraube D1 des Targon® PH eine unzureichende Fixation des Tuberculum minus. In 3 von 5 Fällen lag sie direkt im Sulcus bicipitalis (**Abb. 31**), einmal unmittelbar medial davon. Nur in 1 von 5 Präparaten konnte die Schraube D1 das Fragment fassen. Für den T2™ zeigte sich bei der zentralen Implantation in 3 von 10 Präparaten keine Fixation des Tuberculum minus. Im Gegensatz zum Targon® PH wurde hier jedoch in keinem Fall der Sulcus bicipitalis tangiert, da die Verriegelungsschraube D-zentral medial des Tuberculum minus eingebracht wurde (**Abb. 32**). Bei den lateral eingebrachten Nagelimplantaten des T2™ wurde in 2 von 5 Fällen das Tuberculum minus nicht fixiert und die Verriegelungsschraube D-lateral lag im Sulcus bicipitalis (**Abb. 33**). In einem Fall kam es nach Implantation des T2™ zu einer Fehlverriegelung trotz Verwendung des Zielgerätes (**Abb. 34**). Der Korrekturwinkel für die Schrauben D des Targon® PH lag im Mittel bei 22,5° Anteversion. Für den zentral eingebrachten T2™

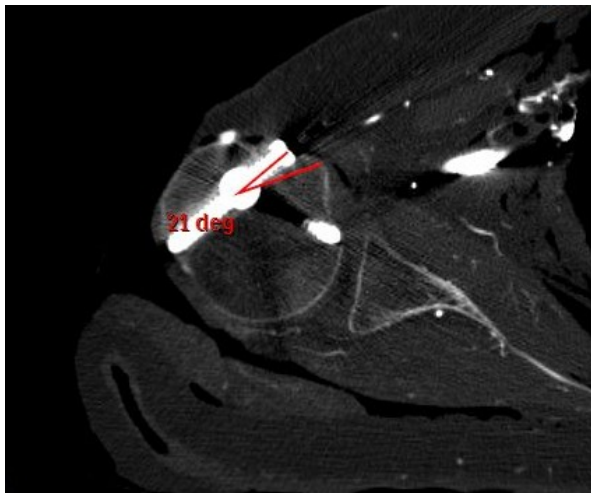
betrug die Korrektur der Verriegelungsschrauben D im Mittel  $23,3^\circ$  Retroversion. Im Fall der nicht korrekt platzierten Verriegelungsschrauben D für das Tuberculum minus bei der lateralen Implantation des T2<sup>TM</sup> wurde ein Korrekturwinkel von  $20^\circ$  Anteversion ermittelt. Für die fehlverriegelte Schraube konnte kein Korrekturwinkel ermittelt werden.



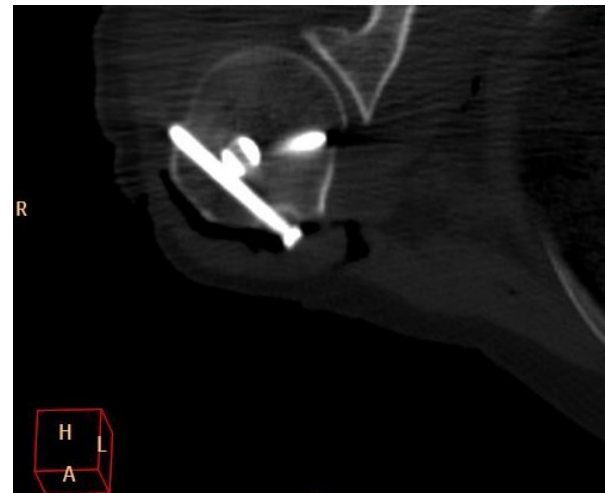
**Abb. 31:** Die Verriegelungsschraube D des Targon® PH liegt im Sulcus bicipitalis, Korrekturwinkel für die Fixation des T. minus  $25^\circ$  Anteversion



**Abb. 32:** Die Verriegelungsschraube D des T2<sup>TM</sup> liegt medial des T. minus mit unzureichender Fixation, Korrekturwinkel  $20^\circ$  Retroversion



**Abb. 33:** Lage der Verriegelungsschraube D im Sulcus bicipitalis nach lateraler Implantationstechnik des T2<sup>TM</sup>, Korrekturwinkel  $21^\circ$  Anteversion



**Abb. 34:** Fehlverriegelung nach Implantation des T2<sup>TM</sup> über einen lateralen Eintrittspunkt mit Schraubenkopf D im Sulcus bicipitalis

## 5. Diskussion

Die operative Versorgung von proximalen Humerusfrakturen wird kontrovers diskutiert. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Osteosyntheseverfahren entwickelt und eingesetzt, wobei über eine definitive Zuordnung bezüglich der Frakturtypen weiterhin Uneinigkeit herrscht. Ziel aller eingesetzten Implantate ist die möglichst anatomische Rekonstruktion der Fraktur mit übungsstabilen Verhältnissen und damit eine frühfunktionelle Nachbehandlung des zumeist geriatrischen Patientengutes. Neben den bewährten Plattenosteosynthesen (Lill et al. 1997) wurden in den letzten Jahren zunehmend minimalinvasive Verfahren entwickelt. Diese Weiterentwicklung wurde durch eine Studie bereits vor vielen Jahren mit initiiert, da durch minimalosteosynthetische Verfahren das Risiko einer Humeruskopfnekrose minimiert werden kann (Kuner und Siebler 1987). Das Auftreten einer avaskulären Knochennekrose des proximalen Humerus, welches in der Literatur unterschiedlich angegeben wird (Lill et al. 1997, Bächli et al. 2001, Neviaser et al. 2011), wird möglicherweise sowohl durch das Trauma und den Frakturtyp als auch von der operativen Behandlung beeinflusst (Sturzenegger et al. 1982, Gardner et al. 2006). Die frakturbedingte Gefährdung der Durchblutungssituation des Humeruskopfes kann durch offene Verfahren mit zusätzlicher Weichteiltraumatisierung sowie Abriss von Weichteil- und Periostverbindungen durch Repositionsmanöver zusätzlich beeinträchtigt werden (Resch et al. 1997, Georgousis et al. 2010). In einer Arbeit von Edelson wurden über einen Zeitraum von 2-9 Jahren 63 Patienten mit komplexen proximalen Humerusfrakturen konservativ behandelt (Edelson et al. 2008). Dabei zeigte sich nur in einem Fall nach 3 Jahren eine Humeruskopfnekrose. Dies erhärtet den Verdacht einer implantat- bzw. operationsassoziierten avaskulären Knochennekrose. Aufgrund dieser Tatsachen hat auch die Marknagelosteosynthese als minimalinvasive Technik immer mehr Verwendung zur Frakturstabilisierung gefunden. Neben dem geringeren Weichteiltrauma während der operativen Versorgung (Kinzl et al. 2005) wurden die Nagelsysteme und Verriegelungsschrauben auch in Bezug auf die Verankerung im osteoporotischen Knochen im Sinne einer Winkel- und Gleitstabilität weiterentwickelt. Die durch den Operationszugang gestörte Integrität der Rotatorenmanschette stellt sich jedoch für die Marknagelosteosynthese als nachteilig heraus (Farragos et al. 1999). Bei ausgewählten osteoporotischen Mehrfragmentfrakturen wird von einigen

Autoren der alloplastische Gelenkersatz bevorzugt (Hartsock et al. 1998). Letztlich herrscht für die operative Versorgung von dislozierten proximalen Humerusfrakturen keine Einigkeit in Hinblick auf eine fraktur- und fragmentabhängige Implantatwahl, wobei das funktionelle Outcome in klinischen Studien für Plattenosteosynthese und Marknagelosteosynthese bisher jedoch keine signifikanten Unterschiede aufwies (Gradl et al. 2009). Der Einsatz winkelstabiler Implantate scheint im Rahmen der Behandlung von instabilen proximalen Humerusfrakturen aktuell die beste Operation zu sein (Hessler et al. 2006)

In dieser anatomischen Arbeit wurden zwei verschiedene Marknagelosteosynthesen verwendet und deren Beziehung zu wichtigen anatomischen Strukturen im Bereich des proximalen Humerus analysiert. Zudem wurden unterschiedliche Operationstechniken in Hinblick auf den Nageleintrittspunkt angewendet. Für die Implantation wurden unfixierte Präparate verwendet und die Implantate in die vollständig erhaltenen Frischleichen eingebracht. Hierdurch sollten die Operationsbedingungen sowie das Gewebe so authentisch wie möglich gehalten werden. In einer vergleichbaren Studie zur Lagebeziehung anatomischer Strukturen zu proximalen Verriegelungsplatten von Ninck et al. wurden die Formalin-fixierten Präparate während der Präparation exartikuliert und erst nach erfolgter Darstellung der anatomischen Strukturen die Implantate eingebracht (Ninck et al. 2012). Hierbei könnte es möglicherweise zu einer ungewollten Lageänderung der relevanten Strukturen kommen. Die von uns eingangs unternommenen Messungen zur Lage des Nervus axillaris im Bereich des proximalen Humerus decken sich weitestgehend mit den benannten Distanzen in der Literatur (**Tabelle 8**). Der mittlere Abstand des ventralen Astes des Nervus axillaris zum Apex des Tuberculum majus betrug in unserer Arbeit 44,3 mm. Die Unterschiede im Vergleich zu den Angaben anderer Autoren ergeben sich aus dem definierten proximalen Messpunkt (Acromionrand, Apex Tuberculum majus, Apex Kalotte). Cetik et al. beschrieben in ihrer Arbeit, dass der Abstand des Nervus axillaris zum Acromion von der Oberarmlänge abhängig ist (Cetik et al. 2006). Lin et al. gaben die Distanz von Nervus axillaris und Tuberculum majus Spitze mit 15 % der durchschnittlichen Oberarmlänge an. Das Acromion als Referenzpunkt sei ungeeignet, da sich durch Schulterbewegungen diese Lagebeziehung ändert (Lin et al. 1999). Durch eine Abduktion des Armes in 90° verringert sich die Distanz zwischen dem mittleren Acromionrand und dem Nervus axillaris in einer Betrachtung von Burkhead et al. um 26,9 % (Burkhead et al. 1992).

Die in unserer Analyse verwendete Referenz des Tuberculum majus Apex erweist sich also zur Positionsdefinition des Nervus axillaris, auch bei Schulterbewegungen, als konsistent.

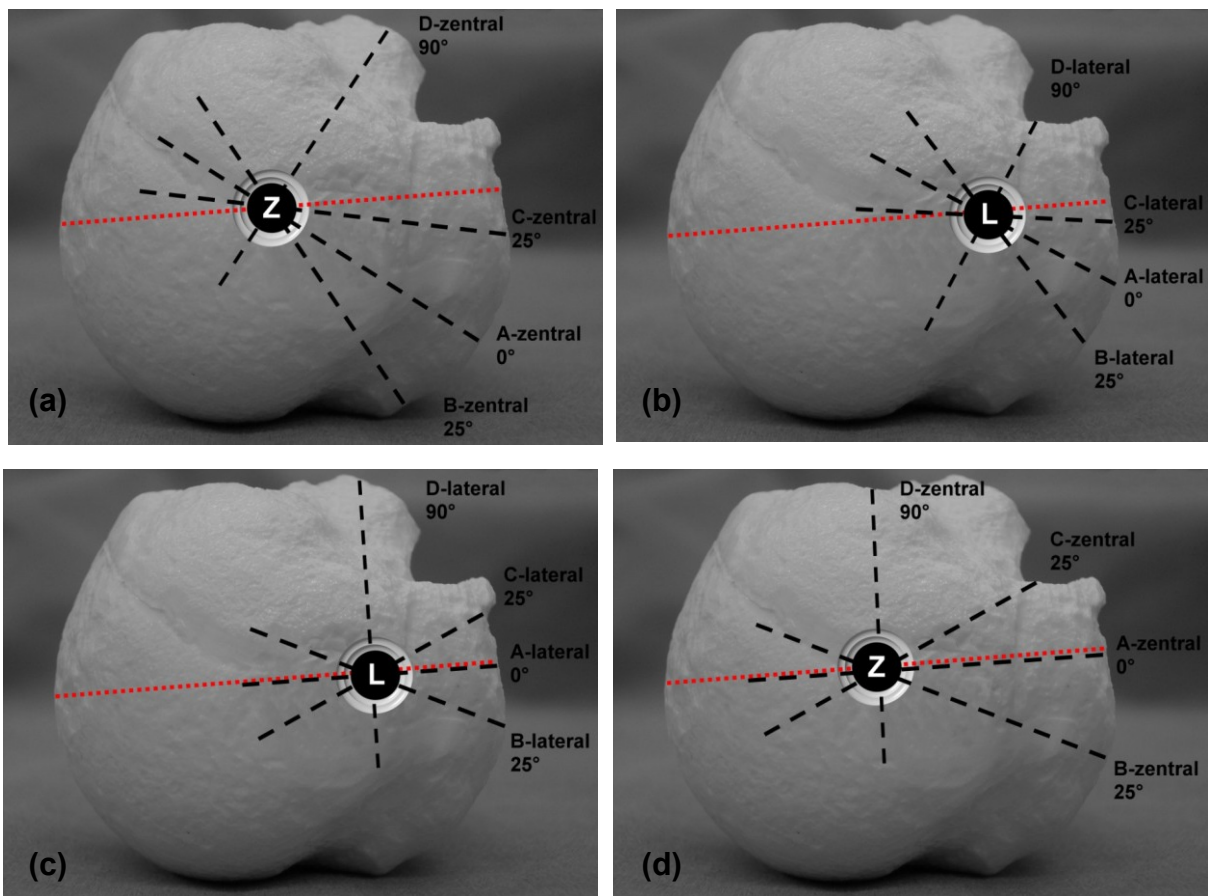
**Tabelle 8**

	Referenz	Position des N. axillaris (mm)
Bono et al. 2000	Apex Humerus	61 (49-69)
Prince et al. 2004	Laterale Acromionunterkante	58,7
Albritton et al. 2003	Anterolateraler Acromionrand	51 (43-63)
Nijs et al. 2008	Lateraler Acromionrand	55,8 (43,3-63,9)
Burkhead et al. 1992	Anterolateraler Acromionrand	57 (41-71)
Lin et al. 1999	Apex Tuberculum majus	45,6 (34-54)
Stecco et al. 2010	Apex Humerus	56 (49-61)
Eigene Arbeit	Apex Tuberculum majus	44,3 (41-50)

In allen von uns definierten Regionen wiesen beide Nagelimplantate Vor- und Nachteile hinsichtlich der Lagebeziehungen zu relevanten anatomischen Strukturen auf. Die größten Unterschiede zeigte unsere Analyse bei der Fixierung des Tuberculum minus Fragmentes. Beide Nagelsysteme zeigten hier eine unzureichende Fixation. Der Targon® PH fixierte das Tuberculum minus nur in 20 % der untersuchten Präparate. Zudem wies dieses Implantat ein signifikant höheres Verletzungspotential für die lange Bizepssehne auf, als der T2™ bei zentraler Implantation. Die Anteversion der Schraube D1 von 70° erweist sich diesbezüglich in unserer Arbeit als nicht ausreichend. Die Verriegelungsschraube D2 des T2™ mit 90° Anteversion gefährdete bei zentraler Implantation zwar in keinem Fall die lange Bizepssehne, jedoch zeigte sich auch hier in 30 % der Präparate eine unzureichende Fixation des Tuberculum minus. In der computertomographischen Betrachtung lagen diese Schraubenimplantate immer medial davon. Somit erscheint eine Angulation der Verriegelungsschraube D2 des T2™ von 90° als zu ausgedehnt.

In unserer Studie wurde stets mit dem Einbringen der proximalen Verriegelungsschraube A, gefolgt von den Schrauben B, C und D begonnen. Zuvor erfolgte bei der Implantation des T2<sup>TM</sup> die Rotationsausrichtung mit Hilfe eines Kirschnerdrahtes im Zielgerät in Bezug auf die Unterarmachse. Für den Targon® PH wurde durch den Operateur der Bizepssehnen sulcus getastet und mit der Bohrhülse für die Verriegelungsschraube D zunächst nur in Richtung des Tuberculum minus gezielt. Ergab dies eine korrekte Rotationsausrichtung, wurde die Bohrhülse gewechselt und mit der Implantation der Verriegelungsschraube A, gefolgt von den Schrauben B, C und D begonnen. Hierbei können durch das Einsetzen der Bohrhülsen oder das Bohren selbst natürlich auch Derotationen des Zielgerätes auftreten und somit die primär eingestellte Ausrichtung verändern. Dies hat auch einen Einfluss auf die Lage der Verriegelungsschrauben. Ferner muss festgehalten werden, dass die initial durchgeführte Rotationsausrichtung mit Kirschnerdraht oder Tastbefund der langen Bizepssehne abhängig vom Operateur ist. Bei einer fehlerhaften primären Ausrichtung bzw. bei Rotationsveränderungen bei der Implantation der Verriegelungsschrauben könnten relevante anatomische Strukturen in der Folge gefährdet werden. Durch die endgültige Fixation des Systems blieb letztlich für die in unserer Arbeit zuletzt implantierte proximale Verriegelungsschraube D selbst unter palpatorischer Kontrolle des Sulcus bicipitalis bzw. der langen Bizepssehne nur eine Möglichkeit der Positionierung. Diese erwies sich jedoch im Ergebnis als ungenügend. Auch ein lateraler Eintrittspunkt erhöhte für den T2<sup>TM</sup> das Risiko einer Verletzung der langen Bizepssehne, obwohl sich der Korridor um den Bizepssehnen sulcus zwischen den benachbarten Verriegelungsschrauben D und C zwischen zentraler und lateraler Implantationstechnik des T2<sup>TM</sup> nicht signifikant änderte. Trotz des verwendeten Kirschnerdrahtes als Hilfsmittel für die Rotationsausrichtung kam es bei 40 % der untersuchten Präparate durch die nach lateral verlagerte Verriegelungsschraube D zu einer Schädigung der langen Bizepssehne. In der Ausgangssituation mit zentraler Implantation wird die Rotation des Nagelsystems über das Zielinstrumentarium mit dem Kirschnerdraht bestimmt und die Schraube D sollte im Ergebnis das Tuberculum minus fixieren (**Abb. 35 a**). Mit der Verlagerung des Eintrittsportals ohne eine Rotation des gesamten Nagelsystems kommt es zu einer Kollision dieser Schraube mit dem Bizepssehnen sulcus (**Abb. 35 b**). Um dies zu vermeiden, ist also eine Rotation des Nagelsystems um die Nagelachse nach innen notwendig. Die Verriegelungsschraube

A rotiert dabei in die zentrale Glenoidebene. Die kalottentragende Verriegelungsschraube C wandert in den intertuberkulären Bereich nahe dem Bizepssehnensulcus. Auch die anderen proximalen Verriegelungsschrauben drehen sich aus dem vorderen Kalottenbereich nach dorsal (**Abb. 35 c**). Umgekehrt kann man aus dieser Position mit einem lateralen Eintrittspunkt das Nagelsystem nicht ohne eine Rotation nach zentral verlagern, da sonst ebenfalls die lange Bizepssehne verletzt werden kann (**Abb. 35 d**). Eine Verschiebung des Eintrittspunktes von medial nach lateral muss also mit einer veränderten Rotation des Nagelsystems einhergehen, um die lange Bizepssehne zu respektieren. Der als Hilfsmittel verwendete Kirschnerdraht scheint dieser Problematik nicht ausreichend Rechnung zu tragen. Ein Vorteil durch einen lateralen Eintrittspunkt des T2™ konnte nicht festgestellt werden.



**Abb. 35 a-d:** Kraniale Aufsicht Humeruskopf mit den proximalen Verriegelungsschrauben A-D bei zentraler (Z) bzw. lateraler (L) Implantation des T2™ sowie die Beziehung zur zentralen Glenoidebene (rot) und zum Bizepssehnensulcus

Die primäre Rotationsausrichtung ist also bei beiden verwendeten Nagelimplantaten und den unterschiedlichen Implantationstechniken hinsichtlich des Eintrittspunktes von entscheidender Bedeutung für die relevanten anatomischen Strukturen.



Das Gefährdungspotential für die lange Bizepssehne durch eine anterior-posteriore Fixierung ist nicht neu. Evans beschrieb nach der Implantation des Seidel-Nagels ähnliche Komplikationen durch die proximal eingebrachten Bolzen (Evans et al. 1993). Auch Faruqui und Hutchins fanden nach der Implantation antegrader Marknagelsysteme in fast der Hälfte der untersuchten Fälle eine Schädigung der langen Bizepssehne durch die proximale Verriegelung (Faruqui und Hutchins 1997). Ratsam ist es beim Einbringen der Bohrhülse bzw. der proximalen Verriegelungsschrauben die Position der langen Bizepssehne palpatorisch zu lokalisieren, was sich zumindest perkutan als schwierig erweist (Gazzillo et al. 2011). Zusammenfassend empfehlen wir die Verriegelungsschraube D zuerst sicher zu platzieren bzw. in Abhängigkeit der Fraktur das Schraubenloch nicht zu besetzen. Dabei sollte erstens der Zugang ggf. erweitert werden, dass neben einer digitalen palpatorischen Kontrolle des Sulcus bicipitalis auch eine visuelle Kontrolle gewährleistet ist. Zweitens sollte die temporäre Transfixation des Zielgerätes im Knochen durch entsprechende Hilfsmittel erfolgen, falls die anterior-posteriore Verriegelung (Schraube D) nicht zuerst durchgeführt wird. Dadurch wird die korrekte Nagelrotation während der Implantation der Verriegelungsschrauben eingehalten und Derotationen und Fehlverriegelungen können vermieden werden.

In Übereinstimmung mit der Arbeit von Nijs et al. hatte die am weitesten distal gelegene proximale Verriegelungsschraube Gefährdungspotential für den ventralen Ast des Nervus axillaris (Nijs et al. 2008). In unserer Studie konnte für den Targon® PH ein Abstand von 18,4 mm sowie für den T2<sup>TM</sup> von 3,3 mm ermittelt werden. Bei Nijs ergab sich für den Targon® PH eine mittlere Distanz von 13,6 mm und für den T2<sup>TM</sup> eine Distanz von 2,7 mm. Auch in anderen Arbeiten wird das Verletzungsrisiko des Nervus axillaris durch die proximale Verriegelung von Humerusmarknägeln beschrieben (Evans et al. 1993, Blum und Rommens 2002, Albritton et al. 2003, Prince et al. 2004). Mit Kenntnis der Verlagerung des Nervus axillaris durch Abduktion bzw. die unterschiedliche Position in Abhängigkeit von der Oberarmlänge bleibt es letztlich eine schwierige Aufgabe, die exakte Position des Nervus axillaris vorherzusagen und demzufolge einen sicheren Korridor für die Implantation der proximalen Verriegelungsschrauben abschließend zu definieren. Zudem beeinflusst die eigentliche Nageleindringtiefe die Position der Verriegelungsschrauben, so dass hier die Knorpelschicht der Kalotte nicht zu weit unterschritten werden sollte (Lill 2006). Lin et al. stellen fest, dass ein zu tiefes Einbringen des Nagels sowie kurze

Humeri und kleine Humerusköpfe das Verletzungsrisiko des Nervus axillaris durch die proximalen Verriegelungsschrauben erhöhen (Lin et al. 1999). Die entsprechenden Orientierungshilfen am Zielgerät selbst oder mittels Messlehre sollten also bei der Einbringtiefe sorgfältig beachtet bzw. verwendet werden. Neben der weichteilschonenden und stumpfen Präparation zur Einbringung der proximalen Verriegelungsschrauben in lateromedialer Richtung nach kutaner Stichinzision ist die Verwendung von Gewebeschutzhülsen mit direktem Knochenkontakt vor der Bohrung der Schraubenlöcher zu fordern (Prince et al. 2004, Nijs et al. 2008, Liu et al. 2011).

Für die distale Verriegelung durch die Schrauben E und F ergaben sich aufgrund der vorgegebenen Verankerungshöhen im Nagel selbst deutliche Unterschiede in Bezug zu den relevanten anatomischen Strukturen im Bereich des proximalen Humerus. Während die Spitze der proximalen der distalen Verriegelungsschrauben E1 des Targon® PH (Nagelbohrung bei 65 mm ab oberem Nagelende) in unmittelbarer Lage zur lateralen Achsellücke lag, befand sich die Spitze der Verriegelungsschraube F1 des Targon® PH in sicherem Abstand zu Nervus axillaris und Arteria circumflexa humeri posterior bzw. zu Nervus radialis und Arteria profunda brachii. Ihre Position im Nagel liegt bei 80 mm ab dem proximalen Nagelende. Genau umgekehrt verhielt es sich mit den distalen Verriegelungsschrauben des T2™. Die entsprechende Bohrung für die Verriegelungsschraube E2 liegt bei 80 mm bzw. für F2 bei 101 mm ab dem proximalen Nagelende (Vergleich Abb. 14). Durch die Spitze der proximalen der distalen Verriegelungsschrauben E2 wurde weder die laterale noch die distale Achsellücke erreicht. Die Spitze der distalen Verriegelungsschraube F2 wurde jedoch in allen Fällen unterhalb des Musculus teres major lokalisiert und hatte damit Gefährdungspotential für Nervus radialis und Arteria profunda brachii vor ihrem Eintritt zwischen den lateralen und medialen Muskelbauch des Musculus triceps brachii und das Septum intermusculare. Ein sicheres Areal kann also für den Ansatzbereich des Musculus teres major vorausgesetzt werden, welcher jedoch entsprechend der Konstitution, der Humeruslänge sowie des Geschlechtes als individuell unterschiedlich zu betrachten ist. Eine exakte Positionsbestimmung anhand anatomischer Landmarken erscheint diesbezüglich nicht möglich. In unserer Analyse konnten keine direkt sichtbaren Schädigungen der relevanten Nerven und Gefäße gefunden werden, jedoch ist durch einen Überstand der Schraubenspitzen bei inkorrekt er Längenmessung eine Irritation des Nerven oder eine Arrosion des

Gefäßes durchaus denkbar (Lill 2006). Für den Nervus axillaris und die Arteria circumflexa humeri posterior in der lateralen Achsellücke wurde eine Verletzungsgefahr durch proximale Verriegelungsschrauben von Riemer und D'Ambrosia dargestellt (Riemer und D'Ambrosia 1992). Dem Operateur (Prof. Dr. med. T. Mückley) ist ein klinischer Fall mit Gefäßverletzung nach Implantation eines kurzen antegraden Marknagels bekannt. Hier kam es durch die Bohrung für die distale Verriegelung zu einer Verletzung der Arteria profunda brachii. Diese Läsion führte zu einer akuten Ischämie des Armes, welche mittels Gefäßinterponat versorgt werden musste. Faruqi und Hutchins berichteten in einer anatomischen Studie zur Humerusnagelung über eine Schädigung des Nervus radialis, welche auch durch den Bohrvorgang hervorgerufen wurde (Faruqi und Hutchins 1997). In der Literatur finden sich enge anatomische Lagebeziehungen des Nervus radialis nach Implantation von Marknagelsystemen bisher nur in Verwendung mit langen Implantaten, beispielsweise bei der Versorgung von Humerusschaftfrakturen durch ante- oder retrograd eingebrachte Nägel. Diese Läsionen betreffen allerdings den Verlauf des Nervus radialis im distalen Humerusdrittel (Port et al. 1997, Guse und Ostrum 1995). Hier wird für die distale Verriegelung eine anterior-posteriore Richtung gegenüber der lateromedialen Verriegelung empfohlen (Rupp et al. 1996, Bono et al. 2000). Verletzungen des Nervus radialis im Bereich der distalen Achsellücke sind nach unserem Kenntnisstand bisher nicht beschrieben. Insgesamt zeigt sich im Vergleich beider Nagelsysteme die Bohrung im Nagel bei 80 mm ab dem proximalen Nagelende (distalste Verriegelungsschraube F1 des Targon® PH bzw. proximale der distalen Verriegelungsschrauben E2 des T2™) in einem ausreichenden Abstand zu lateraler bzw. distaler Achsellücke, so dass diese für die distale Verriegelung bevorzugt werden sollte. Zudem sollte bei der Präparation des Schraubenloches die Gegenkortikalis sorgsam durchbohrt werden, um ein mögliches Eindringen und Aufwickeln der Strukturen durch den Bohrer selbst zu vermeiden.

Betrachtet man den Versuchsaufbau unserer Arbeit, so entspricht er dem Studienprofil einer Arbeit von Mückley et al. In ihr wurden anatomische Strukturen hinsichtlich ihrer Lagebeziehungen zu Nagelimplantaten nach tibioalcaneärer Arthrodesen untersucht. Die Studie wurde an Unterschenkelpaaren von Frischleichen durchgeführt, welche unterhalb des Kniegelenkes amputiert wurden. Bei der Implantation wurden zwei vergleichbare Nagelsysteme standardisiert eingebracht und anschließend die Verriegelungsschrauben über das Zielgerät implantiert. Analog

unserer Arbeit erfolgte nach der Instrumentierung die anatomische Präparation und Dokumentation der gefährdeten Strukturen. Hierfür wurden ebenfalls bestimmte Regionen definiert (Nageleintrittspunkt, Verriegelung distaler Nagelbereich, Verriegelung proximaler Nagelbereich). Die Distanzen zwischen den eingebrachten Implantaten und den anatomischen Strukturen wurden gemessen und zuletzt die ossäre Einbettung des Nagelimplantates mittels Computertomographie analysiert. Im Rahmen der anatomischen Betrachtung kam es auch in der Arbeit von Mückley et al. zu Schädigungen von relevanten Strukturen durch die eingebrachten Nägel bzw. Verriegelungsschrauben (Mückley et al. 2007).

In Hinblick auf die praktische Relevanz unserer Studienergebnisse kann festgehalten werden, dass die von uns dargelegten engen anatomischen Lagebeziehungen des Nagelsystems und insbesondere der Verriegelungsschrauben nicht zu einem klinisch bedeutsamen Schaden führen. Ein Großteil der genannten möglichen Verletzungen von anatomischen Strukturen wird also nicht von dem Patienten oder dem Arzt detektiert. Eine Arbeit von Perlmutter stellt das klinische Erscheinungsbild einer Verletzung des Nervus axillaris als sehr variabel dar. So können Nervenläsionen möglicherweise unentdeckt bleiben, weil die Gelenk- bzw. Knochenverletzung die klinische Symptomatik dominiert. Des Weiteren haben viele Patienten trotz einer kompletten Paralyse des Musculus deltoideus eine hervorragende funktionelle Schulterregeneration. Der klinische Nachweis einer Deltamuskelschwäche kann mitunter schwierig sein (Perlmutter 1999).

In klinischen Studien zu den unterschiedlichen Implantaten und Operationstechniken wurden die von uns genannten möglichen Schädigungsmuster nicht oder nur selten erfasst. Lögters et al. berichteten in einer Falldarstellung über eine direkte Schädigung des Nervus axillaris durch proximale Verriegelungsschrauben mit konsekutiver Atrophie und Paralyse des Musculus deltoideus nach Implantation eines retrograden Nagel (Lögters et al. 2008).

Abschließend ist festzustellen, dass der Operateur die Lokalisation der potentiell gefährdeten anatomischen Strukturen kennen sollte und zudem die mitunter sehr engen Lagebeziehungen dieser Strukturen zu den eingebrachten Implantaten beachtet. Um ein mögliches Verletzungsrisiko der relevanten anatomischen Strukturen im Bereich des proximalen Humerus zu minimieren, könnten die Implantate, Zielgeräte und auch die Operationstechnik optimiert werden. Zudem wäre der Einsatz zusätzlicher technischer Hilfsmittel denkbar, um eine iatrogene

Nervenverletzung bei der Frakturversorgung zu vermeiden. In einer prospektiven Studie von Mills et al. wurde ein SSEP Monitoring des Nervus radialis und des Nervus medianus während der operativen Versorgung von Humerusschaftfrakturen durchgeführt. In 3 von 11 Fällen führten Veränderungen der SSEP zu einer Änderung des Operationsablaufes (Mills et al. 2000). Um das Verletzungsrisiko des Nervus axillaris zu minimieren, könnte die intraoperative Überwachung der SSEP auch bei der Implantation von Verriegelungsschrauben im Bereich des proximalen Humerus verwendet werden (Albritton et al. 2003). Lill et al. beschrieben die arthroskopisch unterstützte Frakturversorgung mittels Nagelosteosynthese, wobei sich hier die genaue Bestimmung des Nageleintrittspunktes, die Versorgung möglicher intraartikulärer Begleitverletzungen und die Beurteilung der Implantatlage als vorteilhaft erwies (Lill et al. 2011).

## 6. Schlussfolgerung

Die von uns untersuchten Marknagelsysteme sind für die Versorgung proximaler Humerusfrakturen geeignet und werden im klinischen Alltag häufig angewendet. Jedoch sollte der Operateur die implantatspezifischen Besonderheiten kennen, da trotz der Ähnlichkeit dieser verwendeten proximalen Humerusnagelsysteme unterschiedliche Gefährdungspotentiale für anatomische Strukturen festzustellen sind. Darüber hinaus ist die Rotationsausrichtung des Nagelsystems bei der Implantation von entscheidender Bedeutung und sehr anspruchsvoll. Diese ist nicht immer sicher vom Operateur festzustellen. Hierbei sollten entsprechende Zielhilfen, wie z.B. die Kirschnerdraht Fixierung des Zielinstrumentariums im Tuberculum minus unbedingt verwendet werden. Bei schwierigen Situationen sind größere Inzisionen zu empfehlen, um damit auch eine visuelle Kontrolle der korrekten Nagel- und Schraubenimplantation zu gewährleisten. Die Technik der arthroskopischen Nagelosteosynthese kann ebenso hilfreich sein.

Für den distalen Verriegelungsbereich im proximalen Humerusschaft können Weiterentwicklungen der Implantate durch einfache Modifikationen das Verletzungspotential relevanter anatomischer Strukturen minimieren.

Das Verschieben des zentralen Eröffnungsportales nach lateral führt zu Veränderungen der Positionierung der Verriegelungsschrauben. Diese sind in anterior-posteriorer Richtung aus unserer Sicht mit einer größeren Verletzungswahrscheinlichkeit von anatomisch relevanten Strukturen (lange Bizepssehne) verbunden. Hier muss das gesamte Nagelsystem um die Nagelachse rotiert werden um die anatomischen Strukturen zu respektieren.

Zusätzliche technische Hilfsmittel (z.B. SSEP Monitoring) könnten das Risiko einer iatrogenen Nervenverletzung minimieren. Die Alltagstauglichkeit dieser Hilfsmittel ist in der klinischen Praxis zu prüfen.

Um das Gefährdungspotential von Marknagelsystemen im Bereich des proximalen Humerus sowie die praktische Relevanz dieses Risikos zu untermauern, bedarf es weiterer randomisierter klinischer multizentrischer Studien.

## Literaturverzeichnis

- Albritton MJ, Barnes CJ, Basamania CJ, Karas SG. 2003. Relationship of the axillary nerve to the proximal screws of a flexible humeral nail system: an anatomic study. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 17(6):411-414.
- Babst R, Brunner F. 2006. Proximale Humerusfrakturen. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, 1(6):521-546. Abbildung 5.
- Bäthis H, Tingart M, Bouillon B, Tiling T. 2001. Die operative Therapie der proximalen Humerusfraktur: Ist die T-Platte noch ein zeitgemäßes Osteosyntheseverfahren? *Zentralblatt für Chirurgie*, 126(3):211-216.
- Blum J, Hansen M, Rommens PM. 2009. Die winkelstabile Marknagelung bei Frakturen am proximalen Humerus mit dem PHN (Proximaler Humerusnagel). *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 21(3):296-311.
- Blum J, Rommens PM. 2002. Proximale Verriegelung von Humerusmarknägeln und Verletzungsrisiko des N. axillaris. *Der Unfallchirurg*, 105(1):9-13.
- Böhler L. 1963. Die Technik der Knochenbruchbehandlung. Verlag Maudrich. Wien.
- Bono CM, Grossmann MG, Hochwald N, Tornetta P 3rd. 2000. Radial and axillary nerves. Anatomic considerations for humeral fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (373):259-264.
- Bosch U, Fremerey RW, Skutek M, Lobenhoffer P, Tscherne H. 1996. Die Hemiarthroplastik – Primär- oder Sekundärmaßnahme für 3- und 4- Fragment-Frakturen des proximalen Humerus beim älteren Menschen? *Der Unfallchirurg*, 99(9):656-664.
- Bosch U, Skutek M, Fremerey RW, Tscherne H. 1998. Outcome after primary and secondary hemiarthroplasty in elderly patients with fractures of the proximal humerus. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 7(5):479-484.

- Braunstein V. 2013. Proximale Humerusfrakturen. Der Unfallchirurg, 116:680-683.
- Burkhead WZ, Scheinberg RR, Box G. 1992. Surgical anatomy of the axillary nerve. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 1(1):31-36.
- Cetik O, Uslu M, Acar HI, Comert A, Tekdemir I, Cift H. 2006. Is there a safe area for the axillary nerve in the deltoid muscle? A cadaveric study. The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume. 88(11):2395-2399.
- Codman EA. 1934. The shoulder. Boston: Thomas Todd Co.
- Cofield RH. 1988. Comminuted fractures of the proximal humerus. Clinical Orthopaedics and Related Research, (230):49-57.
- DeFranco MJ, Lawton JN. 2006. Radial nerve injuries associated with humeral fractures. The Journal of Hand Surgery, 31(4):655–663.
- Edelson G, Safuri H, Salami J, Vigder F, Militianu D. 2008. Natural history of complex fractures of the proximal humerus using a three-dimensional classification system. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 17(3):399-409.
- Evans PD, Conboy VB, Evans EJ. 1993. The Seidel humeral locking nail: an anatomical study of the complications from locking screws. Injury: The British Journal of Accident Surgery, 24(3):175-176.
- Farragos AF, Schemitsch EH, McKee MD. 1999. Complications of intramedullary nailing for fractures of the humeral shaft: a review. Journal of Orthopaedic Trauma, 13(4):258-267.
- Faruqui NA, Hutchins PM. 1997. Humeral nailing – an anatomical study. The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume, 79-B:Supp I:102.
- Fa. Aesculap. 2007. Operationstechnik Targon ® PH Targon ® H. Prospekt-Nr. 18901.



- Fa. Stryker. 2007. T2™ Proximales Humerusnagel System Operationsanleitung. Literatur-Nr.: TR-T2-Prox-Hum-OT-0405.
- Franke S, Ambacher T. 2012. Die proximale Humerusfraktur – konservativ vs. operativ: wann und wie? Obere Extremität 2012, 7(3):137-143.
- Gardner MJ, Voos JE, Wanich T, Helfet DL, Lorch DG. 2006. Vascular implications of minimally invasive plating of proximal humerus fractures. Journal of Orthopaedic Trauma, 20(9):602-607.
- Gazzillo GP, Finnoff JT, Hall MM, Sayeed YA, Smith J. 2011. Accuracy of palpating the long head of the biceps tendon: an ultrasonographic study. PM & R the journal of injury, function and rehabilitation, 3(11):1035-1040.
- Georgousis M, Kontogeorgakos V, Kourkouvelas S, Badras S, Georgaklis V, Badras L. 2010. Internal fixation of proximal humerus fractures with the polaris intramedullary nail. Acta Orthopaedica Belgica, 76(4):462-467.
- Gerber C, Schneeberger AG, Vinh TS. 1990. The arterial vascularization of the humeral head. An anatomical study. The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume, 72(10):1486-1494.
- Gradl G, Dietze A, Käb M, Hopfenmüller W, Mittlmeier T. 2009. Is locking nailing of humeral head fractures superior to locking plate fixation? Clinical Orthopaedics and Related Research, 467(11):2986-2993.
- Guse TR, Ostrum RF. 1995. The surgical anatomy of the radial nerve around the humerus. Clinical Orthopaedics and Related Research, (320):149-153.
- Habermeyer P. 1997. Die Humeruskopffraktur. Der Unfallchirurg, 100(10):820-837.
- Habermeyer P, Schweiberer L. 1989. Frakturen des proximalen Humerus. Der Orthopäde, 18(3):200-207.

- Habermeyer P, Schweiberer L. 1991. Oberarmkopffrakturen. Konservative und operative Differentialtherapie. *Der Unfallchirurg*, 94(9):438-446.
- Hartsock LA, Estes WJ, Murray CA, Friedman RJ. 1998. Shoulder hemiarthroplasty for proximal humeral fractures. *The Orthopedic Clinics of North America*, 29(3):467-475.
- Hertel R, Hempfing A, Stiehler M, Leunig M. 2004. Predictors of humeral head ischemia after intracapsular fracture of the proximal humerus. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 13(4):427-433.
- Hessler C, Schmucker U, Matthes G, Ekkernkamp A, Gütschow R, Eggers C. 2006. Ergebnisse nach Versorgung instabiler proximaler Humerusfrakturen mittels winkelstabiler Platte. *Der Unfallchirurg*, 109(10):867-874.
- Hettrich CM, Boraiah S, Dyke JP, Neviaser A, Helfet DL, Lorch DG. 2010. Quantitative assessment of the vascularity of the proximal part of the humerus. *The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume*, 92(4):943-948.
- Hillbricht S, Stürzebecher K, Suhren J, Kasch R, Herzog J, Schulz AP. 2013. Plattenosteosynthese oder Marknagelung bei proximaler Humerusfraktur – Retrospektive Analyse von 156 Fällen über 3 Jahre mit einem 2-Jahres-Follow-up. *Obere Extremität*, 8:144-149.
- Katthagen JC, Voigt C, Jensen G, Lill H. 2012. Nagelosteosynthese proximaler Humerusfrakturen. *Obere Extremität*, 7(3):128-136.
- Kinzl L, Eisele R, Liener UC. 2005. Nagelsystem am proximalen Humerus. *Aktuelle Traumatologie*, 35(3):108-112.
- Koval KJ, Gallagher MA, Marsicano JG, Cuomo F, McShinawy A, Zuckerman JD. 1997. Functional outcome after minimally displaced fractures of the proximal part of the humerus. *The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume*, 79(2):203-207.

- Krettek C, Wiebking U. 2011. Proximale Humerusfraktur – Ist die winkelstabile Plattenosteosynthese der konservativen Behandlung überlegen? Der Unfallchirurg, 114:1059-1067.
- Kuner EH, Siebler G. 1987. Luxationsfrakturen des proximalen Humerus – Ergebnisse nach operativer Behandlung. Eine AO-Studie über 167 Fälle. Unfallchirurgie, 13(2):64-71.
- Laing PG. 1956. The arterial supply of the adult humerus. The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume, 38-A(5):1105-1116.
- Lanting B, MacDermid J, Drosdowech D, Faber KJ. 2008. Proximal humeral fractures: a systematic review of treatment modalities. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 17(1):42-54
- Lill H. 2006. Die proximale Humerusfraktur. Neue Techniken – Neue Implantate – Tipps und Tricks. 1. Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Lill H, Josten C. 2000. Proximale und distale Humerusfrakturen im hohen Alter. Der Orthopäde, 29(4):327-341.
- Lill H, Katthagen C, Hertel A, Gille J, Voigt C. 2011. All-arthroscopic intramedullary nailing of 2- and 3-part proximal humeral fractures: a new arthroscopic technique and preliminary results. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 132(5):641-647.
- Lill H, Lange K, Prasse-Badde J, Schmidt A, Verheyden P, Echtermeyer V. 1997. Die T-Platten-Osteosynthese bei dislozierten proximalen Humerusfrakturen. Unfallchirurgie, 23(5):183-190.
- Lin J, Hou SM, Inoue N, Chao EY, Hang YS. 1999. Anatomic considerations of locked humeral nailing. Clinical Orthopaedics and Related Research, (368):247-254.

- Lippert H. 2000. Lehrbuch der Anatomie 5. Auflage. München, Jena: Urban & Fischer Verlag.
- Liu KY, Chen TH, Shyu JF, Wang ST, Liu JY, Chou PH. 2011. Anatomic study of the axillary nerve in Chinese cadaveric population: correlation of the course of the nerve with proximal humeral fixation with intramedullary nail or external skeletal fixation. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 131(5):669-674.
- Lögters TT, Wild M, Windolf J, Linhart W. 2008. Axillary nerve palsy after retrograde humeral nailing: clinical confirmation of an anatomical fear. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 128(12):1431-1435.
- Mathews J, Lobenhoffer P. 2007. Osteosynthese instabiler proximaler Humerusfrakturen mit dem Targon® PH Nagel. Operative Orthopädie und Traumatologie, 19:255-275.
- Meyer C, Alt V, Hassanin H, Heiss C, Stahl JP, Giebel G, Koebke J, Schnettler R. 2005. The arteries of the humeral head and their relevance in fracture treatment. Surgical and Radiologic Anatomy, 27(3):232-237.
- Mills WJ, Chapman JR, Robinson LR, Slimp JC. 2000. Somatosensory evoked potential monitoring during closed humeral nailing: a preliminary report. Journal of Orthopaedic Trauma, 14(3):167-170.
- Mittlmeier T, Stedtfeld HW. 2004. Stabilisation von Humeruskopffrakturen mittels antegrader winkelstabiler Verriegelungsmarknagelung (Targon® PH). Trauma und Berufskrankheit. Supplement 1-2005:15-26. Abbildung 1.
- Mittlmeier TW, Stedtfeld HW, Ewert A, Beck M, Frosch B, Gradl G. 2003. Stabilization of proximal humeral fractures with an angular and sliding stable antegrade locking nail (Targon® PH). The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume, 85-A Suppl 4:136-146.

- Murray IR, Amin AK, White TO, Robinson CM. 2011. Proximal humeral fractures: current concepts in classification, treatment and outcomes. *Journal of Bone & Joint Surgery. British volume*, 93:1-11.
- Mückley T, Ullm S, Petrovitch A, Klos K, Beimel C, Fröber R, Hofmann GO. 2007. Comparison of two intramedullary nails for tibiototalcalcaneal fusion: anatomic and radiographic considerations. *Foot & Ankle International*, 28(5):605-613.
- Müller ME, Allgöwer M, Schneider R, Willenberger H. 1992. *Manual der Osteosynthese*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Neer CS 2nd. 1970. Displaced proximal humeral fractures. I. Classification and evaluation. *The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume*, 52(6):1077-1089.
- Neer CS 2nd. 1970. Displaced proximal humeral fractures. II. Treatment of three-part and four-part displacement. *The Journal of Bone & Joint Surgery. American volume*, 52(6):1090-1103.
- Neviaser AS, Hettrich CM, Dines JS, Lorch DG. 2011. Rate of avascular necrosis following proximal humerus fractures treated with a lateral locking plate and endosteal implant. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 131(12):1617-1622.
- Nijs S, Sermon A, Broos P. 2008. Intramedullary fixation of proximal humerus fractures: do locking bolts endanger the axillary nerve or the ascending branch of the anterior circumflex artery? A cadaveric study. *Patient Safety in Surgery*, 2(1):33. DOI 10.1186/1754-9493-2-33.
- Ninck J, Heck S, Gick S, Koebeke J, Pennig D, Dargel J. 2012. Versorgung von Humeruskopffrakturen. Lagebeziehung proximaler Verriegelungsplatten zum N. axillaris. *Der Unfallchirurg*, DOI 10.1007/s00113-012-2242-8.

- Paulsen F, Waschke J. 2010. Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen Band 1. 23. Auflage. München: Urban & Fischer Verlag. Abbildungen 3.77 und 3.151 mit freundlicher Genehmigung.
- Perlmutter GS. 1999. Axillary nerve injury. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (368):28-36.
- Port AM, Nanu AM, Cross AT. 1997. Windows for humeral interlocking nails. An anatomical study. *Journal of Bone & Joint Surgery. British volume* 79-B:Suppl:102.
- Prince EJ, Breien KM, Fehringer EV, Mormino MA. 2004. The relationship of proximal locking screws to the axillary nerve during antegrade humeral nail insertion of four commercially available implants. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 18(9):585-588.
- Rasmussen S, Hvass I, Dalsgaard J, Christensen BS, Holstad E. 1992. Displaced proximal humeral fractures: results of conservative treatment. *Injury*, 23(1):41-43.
- Resch H, Povacz P, Fröhlich R, Wambacher M. 1997. Percutaneous fixation of three- and four part fractures of the proximal humerus. *The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume*, 79(2):295-300.
- Riemer BL, D'Ambrosia R. 1992. The risk of injury to the axillary nerve, artery, and vein from proximal locking screws of humeral intramedullary nails. *Orthopedics*, 15(6):697-699.
- Rose SH, Melton LJ 3rd, Morrey BF, Ilstrup DM, Riggs BL. 1982. Epidemiologic features of humeral fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (168):24-30.

- Rupp RE, Chrissos MG, Ebraheim NA. 1996. The risk of neurovascular injury with distal locking screws of humeral intramedullary nails. *Orthopedics*, 19(7):593-595.
- Siebenrock KA, Gerber C. 1992. Frakturklassifikation und Problematik bei proximalen Humerusfrakturen. *Der Orthopäde*, 21(2): 98-105.
- Siegel HJ, Lopez-Ben R, Mann JP, Ponce BA. 2010. Pathological fractures of the proximal humerus treated with a proximal humeral locking plate and bone cement. *The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume*, 92(5):707-712.
- Stecco C, Gagliano G, Lancerotto L, Tiengo C, Macci V, Porzionato A, De Caro R, Aldegheri R. 2010. Surgical anatomy of the axillary nerve and its implication in the transdeltoid approaches to the shoulder. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 19(8):1166-1174.
- Stedtfeld HW. 2011. Tipps und Tricks für die Fixation von Humeruskopffrakturen mit einem proximalen Humerusnagel. *Obere Extremität*, 6:52-60.
- Stedtfeld HW, Wick M, Winkler R, Attmanspacher W. 2004. Marknagelosteosynthesen – Indikation, Technik, sinnvoller Fortschritt (!?). *Trauma und Berufskrankheit*, 6(Suppl2):S241-S246.
- Sturzenegger M, Fornaro E, Jakob RP. 1982. Results of surgical treatment of multifragmented fractures of the humeral head. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 100(4):249-259.
- Szyszkowitz R, Schippinger G. 1999. Die Frakturen des proximalen Humerus. *Der Unfallchirurg*, 102(6):422-428.
- Szyszkowitz R, Seggl W, Schleifer P, Cundy PJ. 1993. Proximal humeral fractures. Management techniques and expected results. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (292):13-25. Abbildungen 1A und 1B.

- Thiel W. 2005. Photographischer Atlas der Praktischen Anatomie. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Towfigh H, Bühl W, Obertacke U. 1993. Behandlungsergebnisse nach konservativer und operativer Versorgung von proximalen Oberarmfrakturen. Aktuelle Traumatologie, 23(8):354-360.
- Tubbs RS, Parmar A, Noordeh N, Rogers C, Rogers N, Loukas M, Shoja MM, Cohen Gadol AA. 2008. Surgical anatomy of the radial nerve and profunda brachii artery within the triangular interval. Italian Journal of Anatomy and Embryology, 113(3):129-134.
- Tubbs RS, Tyler-Kabara EC, Aikens AC, Martin JP, Weed LL, Salter EG, Oakes WJ. 2005. Surgical anatomy of the axillary nerve within the quadrangular space. Journal of Neurosurgery, 102(5):912-914.
- Zyto K, Ahrengart L, Sperber A, Törnkvist H. 1997. Treatment of displaced proximal humeral fractures in elderly patients. The Journal of Bone & Joint Surgery. British volume, 79(3):412-417.
- Zyto K, Kronberg M, Broström LA. 1995. Shoulder function after displaced fractures of the proximal humerus. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 4(5):331-336.



# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Name: Daniel Gröschel  
Geburtsdatum: 07.05.1982 in Altenburg  
Familienstand: verheiratet, 3 Kinder (geb. März 2008, März 2011, Juni 2014)

## Schul Ausbildung:

1988 – 1992 Erich-Mäder-Grundschule Altenburg  
1992 – 2000 Platanengymnasium Altenburg  
06/2000 Abitur Platanengymnasium Altenburg

## Medizinstudium:

2001 – 2007 Studium der Humanmedizin an der Friedrich-Schiller-Universität  
Jena  
09/2003 Ärztliche Vorprüfung  
11/2007 Ärztliche Prüfung und Approbation

## Berufliche Tätigkeit:

2003 – 2006 Tutor im Institut für Anatomie I Friedrich-Schiller-Universität  
Jena  
2008 – 2014 Assistenzarzt, Orthopädisch-Traumatologisches Zentrum, Helios  
Park-Klinikum Leipzig  
06/2012 Zertifikat für Manuelle Medizin/Chirotherapie (DGMM)  
Seit 05/2014 Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie, Orthopädisch-  
Traumatologisches Zentrum, Helios Park-Klinikum Leipzig

Ort, Datum

Unterschrift

## Danksagung

Für die Überlassung des Themas gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Dr. G. O. Hofmann.

Zudem danke ich ganz besonders Herrn Prof. Dr. med. T. Mückley, der mich bei der Durchführung der Arbeit sowie der Erstellung des Manuskripts betreut und stets unterstützt hat.

Weiterhin danke ich Frau OÄ Dr. med. R. Fröber (Institut für Anatomie I Jena), den Mitarbeiterinnen der Prosektur Frau S. Müller und Frau F. Raab sowie Herrn M. Szabó (Klinisches Medienzentrum), die zur organisatorischen Umsetzung maßgeblich beigetragen haben.

Für die beratende und unterstützende Hilfe in der Datenverarbeitung und Auswertung danke ich Frau C. Beimel (MSc.) (Stryker Trauma GmbH).

Von ganzem Herzen danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre fortwährende Motivation, Unterstützung und aufgebrachte Geduld bei der Erstellung dieser Arbeit.

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Herr Prof. Dr. med. T. Mückley, Frau C. Beimel (MSc.).

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers